Agriculture et Agroalimentaire Canada | Agriculture and Agri-Food Canada

UNE AGRICULTURE EFFICACE POUR UN AIR PLUS SAIN

Une analyse scientifique des liens entre les pratiques agricoles et les gaz à effet de serre au Canada

Canada

Digitized by the Internet Archive
in 2011 with funding from
Agriculture and Agri-Food Canada – Agriculture et Agroalimentaire Canada

http://www.archive.org/details/uneagricultureef00otta

Agriculture et Agroalimentaire Canada
Agriculture and Agri-Food Canada

Une agriculture efficace pour un air plus sain

Une analyse scientifique des liens entre les pratiques agricoles et les gaz à effet de serre au Canada

Mars 2008

Réviseurs scientifiques :
H.H. Janzen, R.L. Desjardins, P. Rochette, M. Boehm et D. Worth

Canada

Pour obtenir des exemplaires additionnels de cette publication ou pour demander un exemplaire sur support de substitution, veuillez communiquer avec :

Section des publications
Agriculture et Agroalimentaire Canada
Édifice Sir-John-Carling
930, avenue Carling
Ottawa (Ontario) K1A 0C5

Téléphone : 613-759-6610
Télécopieur : 613-759-6783
Courriel : publications@agr.gc.ca

Version électronique accessible à l'adresse http://www.agr.gc.ca/nlwis-snite/

Cette publication peut être reproduite sans autorisation dans la mesure où la source est indiquée en entier.

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, 2008

Catalogage avant publication de Bibliothèque et Archives Canada

Janzen, H. Henry, 1956-
Une agriculture efficace pour un air plus sain : une analyse scientifique des liens entre les pratiques agricoles et les gaz à effet de serre au Canada / H. Henry Janzen.

Publié aussi en anglais sous le titre : Better Farming, Better Air: A scientific analysis of farming practice and greenhouse gases in Canada.

ISBN 978-0-662-07829-6
N° de cat. : A52-83/2008F
N° d'AAC : 10530F

1. Gaz à effet de serre--Réduction--Canada. 2. Gaz carbonique--Réduction--Canada. 3. Agriculture durable--Canada. 4. Agriculture--Aspect de l'environnement--Canada. 5. Industries agricoles--Aspect de l'environnement--Canada. 6. Politique agricole--Aspect de l'environnement--Canada. I. Canada. Agriculture et Agroalimentaire Canada. II. Titre. III. Titre : Analyse scientifique des liens entre les pratiques agricoles et les gaz à effet de serre au Canada.

HC120.E5J3614 2008 363.738'7460971 C2008-980016-8

IMPRIMÉ AU CANADA
PRINTED IN CANADA

100 % de matières recyclées après consommation

Avant-propos

À titre de sous-ministre adjoint de la Direction générale de la recherche d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC), je suis fier de vous présenter ce livre : *Une agriculture efficace pour un air plus sain*. Cet ouvrage est le résultat d'un travail collectif entrepris pour donner suite à un engagement pris en 2001 par AAC à l'égard du Conseil du Trésor en vertu du Cadre de gestion et de responsabilisation axé sur les résultats (CGRR) dans le contexte du Programme de modèles d'exploitations agricoles. *Une agriculture efficace pour un air plus sain* présente un résumé de nos connaissances des flux de gaz à effet de serre (GES) dans les exploitations agricoles au Canada. Ce document décrit la contribution du secteur agricole aux émissions canadiennes de GES et le rôle de l'agriculture dans la réduction de ces émissions.

La composition de l'air est un phénomène complexe qui peut être influencé par l'activité humaine. À titre de fournisseur d'aliments et de moteur de notre économie, l'agriculture est un des secteurs de l'activité humaine où des mesures peuvent être prises pour améliorer la qualité de l'air et ainsi contribuer au bien-être des générations futures au Canada. En étudiant les processus agricoles complexes qui ont une incidence sur l'air que nous respirons, les scientifiques d'AAC nous permettent de mieux comprendre le système. Ils misent sur cette compréhension pour élaborer des pratiques agricoles améliorées. *Une agriculture efficace pour un air plus sain* présente les résultats d'une recherche de calibre mondial qui décrit l'état de nos connaissances en matière de pratiques agricoles, montre à l'aide d'exemples de quelle façon le secteur de l'agriculture peut contribuer à améliorer la qualité de l'air et souligne les importantes réalisations que nous avons obtenues au cours des dernières années.

Ce livre est un ajout précieux à la collection de ressources d'information sur l'environnement que nous sommes fiers de mettre à la disposition des intervenants du secteur agricole, des responsables de l'élaboration des politiques et de la population canadienne en général.

Marc Fortin
Sous-ministre adjoint
Direction générale de la recherche

Préface

Une phrase tirée du paragraphe de conclusion de ce livre exceptionnel résume parfaitement l'esprit de la publication : nous devons de nouveau envisager les terres agricoles non pas comme une ressource à exploiter, mais comme un environnement où vivre, que nous y résidions ou non. Cet énoncé concorde parfaitement avec ce que l'éminent écologiste, forestier et environnementaliste américain Aldo Leopold a écrit : « Nous abusons de la terre parce que nous la considérons comme une denrée qui nous appartient. Lorsque nous la voyons comme une communauté à laquelle nous appartenons, nous pouvons commencer à l'utiliser avec amour et respect. »

De fait, l'adoption de pratiques de gestion agricole fondées sur des principes écologiques doit constituer une composante intégrale de toute solution aux problèmes environnementaux de l'ère moderne. Cette adoption est importante non seulement pour répondre aux demandes alimentaires des 6,5 milliards d'habitants de la planète (population qui devrait atteindre neuf milliards en 2050), mais aussi pour contrer les émissions provenant de la combustion de combustibles fossiles. L'agriculture, gérée écologiquement, peut séquestrer le carbone dans les sols et les arbres, dénaturer les contaminants par la photoremédiation et les procédés microbiens, filtrer les polluants des eaux naturelles en utilisant le sol comme biomembrane et produire la biomasse nécessaire à la fabrication des biocarburants modernes (éthanol, biodiesel).

Le but visé par le Programme de modèles d'exploitations agricoles, à l'origine de ce livre, était d'améliorer la précision des estimations des émissions de gaz à effet de serre (GES) des exploitations agricoles et de l'agriculture canadiennes et de trouver des moyens de réduire les émissions des exploitations agricoles. Le thème est en accord avec le Protocole de Kyoto, ratifié par le Canada en 2002, pour la période d'émission 2008-2012 et au delà. Le Programme de modeles d'exploitations agricoles visait notamment les trois objectifs suivants : améliorer la compréhension scientifique des émissions des exploitations agricoles canadiennes, vérifier l'inventaire des émissions au Canada pour être en mesurer de respecter nos engagements internationaux et créer une méthode pour l'analyse holistique des émissions de GES de l'ensemble des systèmes de production. L'obtention de données fiables est essentielle à la gestion durable des sols agricoles. L'agriculture peut espérer répondre aux demandes nombreuses et émergentes de la société uniquement par une planification à long terme, reposant sur des données solides.

L'évaluation des émissions en équivalent de CO_2 (dioxyde de carbone) suppose l'obtention d'estimations crédibles des émissions de tous les GES : CO_2, CH_4 (méthane) et N_2O (oxyde nitreux) pour divers sols et scénarios de gestion (p. ex., travail du sol et autres opérations agricoles, bétail, fumures azotées). Les modèles scientifiques, élaborés spécifiquement pour prédire les émissions des exploitations agricoles canadiennes, doivent être validés à l'aide de mesures directes prises pour diverses utilisations du sol et pratiques de gestion. L'équipe de projet du Programme de modèles d'exploitations agricoles, formée de professionnels de renommée internationale, a élaboré méticuleusement une méthodologie et un modèle qui peuvent être utilisés dans d'autres pays. Les mérites du modèle sont nombreux :

- Fondé sur une approche écosystémique et une vue holistique
- Présente des solutions gagnantes
- Examine le rôle des biocarburants
- Aborde divers systèmes de production
- Tient compte de tous les GES et pas seulement du CO_2
- Fondé sur une approche positive de l'utilisation de l'agriculture comme solution au problème du réchauffement de la planète

Une agriculture efficace pour un air plus sain constitue une référence exceptionnelle pour divers intervenants, dont les chercheurs agricoles, les décideurs, les écologistes et le grand public. Son format est simple et convivial. Il transmet un message fort sur la façon dont la gestion agricole influe sur l'air et montre clairement dans quelle mesure l'adoption de pratiques prudentes de gestion et d'affectation du sol peut atténuer les stress environnementaux du XXIe siècle.

Rattan Lal

Professeur en science du sol
The Ohio State University
Columbus, OH 43210 USA

Remerciements

Les résultats présentés ont été financés en partie par le Programme de modèles d'exploitations agricoles d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC). Nous tenons à remercier ceux qui ont établi ce programme ainsi que les nombreux administrateurs et collaborateurs qui ont appuyé et guidé ces efforts. En particulier, nous tenons à exprimer notre reconnaissance aux innombrables collaborateurs – chercheurs de l'extérieur d'AAC, producteurs, spécialistes de l'industrie et membres intéressés du grand public – qui ont encouragé la recherche et aidé à la diriger. Les versions précédentes de ce livre ont été révisées par Richard Asselin, Con Campbell, Henry Hengeveld, Barry Grace, Chang Liang, Alex Milton, Claude Lemieux, Leslie Cramer et Sheila Torgunrud, qui ont gracieusement fourni de nombreux commentaires perspicaces et correctifs. Rattan Lal a accepté de rédiger la préface du livre, ce pourquoi nous lui devons toute notre gratitude. Nous tenons surtout à remercier les techniciens, le personnel de bureau, les metteurs en page, le personnel des parcelles d'essai, les éleveurs de bétail, les gestionnaires locaux et les nombreuses autres personnes qui ont travaillé avec diligence et dans l'ombre. Ils ont accompli une grande partie du travail décrit dans le document, et nous ne les remercions pas toujours suffisamment.

Les rédacteurs en chef

Auteurs

Agriculture et Agroalimentaire Canada reconnaît l'importante contribution des auteurs suivants dans l'élaboration de ce livre (les auteurs principaux d'une ou de plusieurs sections sont désignés par un astérisque) : D. Angers *, K.A. Beauchemin, C. Benchaar, S. Bittman, M.A. Bolinder, M. Boehm*, S. Claveau, R.L. Desjardins*, C.F. Drury, J.A. Dyer, S. Gameda, B. Grant, E. Gregorich*, L.J. Gregorich, H.H. Janzen*, R.L. Lemke*, D.I. Massé*, L. Masse, T.A. McAllister, B. McConkey, S.M. McGinn*, N.K. Newlands*, E. Pattey*, R.L. Raddatz, P. Rochette*, E.G. Smith*, W. Smith, F. Tremblay, A.J. VandenBygaart, D. Worth, X. Vergé et B. Zebarth.

Pour rendre cette publication lisible à une large audience, beaucoup de références, à l'origine citées par les auteurs, ont été enlevées et remplacées par des sources plus générales reportées à la fin de chaque section. Cela ne diminue en aucun cas la reconnaissance que nous portons à tous les scientifiques non cités dont la perspicacité et les découvertes sont reportées dans ces pages.

Contenu

Sommaire 2

Introduction 16

Les gaz

Dioxyde de carbone 22

Oxyde nitreux 38

Méthane 56

Les quantités

Mesurer les puits et sources de GES 80

Les émissions agricoles 90

Faire le bilan 104

La situation dans son ensemble

Une perspective holistique 112

Trouver les solutions gagnantes 124

L'avenir

Les promesses des biocarburants 130

Restaurer la qualité de l'air 142

Ce que l'avenir nous réserve 152

Retour aux sources 162

Sommaire

L'ATMOSPHÈRE EN ÉVOLUTION

L'AIR QUI NOUS ENTOURE EST À PEINE PERCEPTIBLE. Invisible et silencieux, il s'infiltre dans tous les organismes vivants, enveloppant la terre de son flux continu. Milieu apparemment inerte, il est le siège d'une multitude d'activités qui se déroulent à notre insu : des molécules gazeuses de toutes sortes vont et viennent, réagissent, se recombinent, sont aspirées et expirées par les plantes et les animaux, et sont continuellement pourchassées par les rayons du soleil.

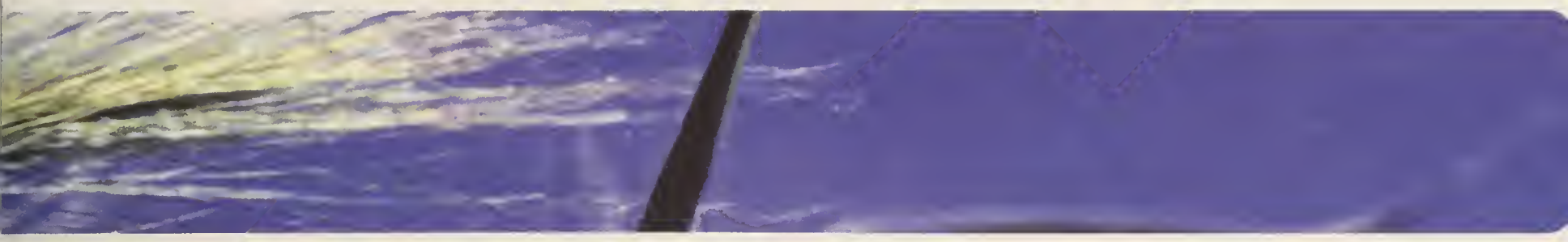
Grâce à son mouvement perpétuel, l'air nous garde en vie. Il nous alimente en carbone, insufflé par l'énergie du soleil, et il nous fournit l'oxygène que nous respirons et avec lequel nous assimilons la nourriture ingérée. De plus, il est porteur des protéines dont nous avons besoin, comme l'azote qui provient fondamentalement de l'air. Notre survie et celle de toute forme de vie sur la Terre est assurée par ces gaz qui circulent dans ce que nous appelons l'atmosphère.

Nous dépendons également de l'atmosphère pour une autre raison : elle nous garde au chaud. Certains des gaz atmosphériques – entre autres, le dioxyde de carbone, le méthane et l'oxyde nitreux – empêchent la chaleur du sol de s'échapper rapidement dans l'espace. Sans ces *gaz à effet de serre*, ou GES, notre planète ne serait pas cette oasis qui, depuis déjà des éternités, existe au milieu des étendues glaciales de l'espace.

Mais l'air d'aujourd'hui n'est plus ce qu'il était. L'occupation humaine est de plus en plus dense – notre population a doublé en seulement 40 ans – et nous avons réorganisé notre monde grâce à des inventions révolutionnaires, affectant ainsi l'atmosphère. La concentration accrue de dioxyde de carbone se trouve au premier plan : elle est passée de 280 parties par million (ppm) à plus de 380 ppm en seulement quelques siècles, principalement en raison du brûlage des combustibles fossiles et du défrichage des forêts tropicales. La concentration d'autres GES – de l'oxyde nitreux et du méthane – a aussi augmenté. Les scientifiques s'inquiètent donc de plus en plus : si ces tendances se maintiennent, engendrerons-nous des changements climatiques irréversibles et lourds de conséquences?

Le rôle des exploitations agricoles

Les exploitations agricoles – champs, pâturages, sols et animaux – sont étroitement liées à l'évolution de l'atmosphère. Elles constituent d'importantes sources de GES : CH_4 (méthane) produit par la respiration et les excréments des animaux d'élevage; N_2O (oxyde nitreux) provenant de l'azote des sols et



du fumier; CO_2 (dioxyde de carbone) issu du carburant brûlé par les tracteurs et dans les bâtiments d'élevage. Elles stockent également du carbone, en majeure partie dans leurs sols. S'il est mal géré, ce carbone peut s'échapper dans l'atmosphère sous forme de CO_2, comme ce fut le cas dans le passé. Cependant, une bonne gestion de ce dernier peut permettre de récupérer une partie du carbone perdu et ainsi d'*éliminer* le CO_2 de l'atmosphère. En raison de l'étroite relation qui existe entre les exploitations agricoles et la qualité de l'air, les activités des agriculteurs – la manière dont ils gèrent leurs terres et leur bétail – ont une profonde incidence sur l'air qui nous entoure. Même si peu d'entre nous en sont conscients, les choix des agriculteurs ont des répercussions, souvent bénéfiques, sur l'ensemble de la population.

Notre intention est de montrer, brièvement, l'impact des activités des agriculteurs sur l'atmosphère et en quoi leurs futurs choix peuvent contribuer à atténuer une part des stress environnementaux à l'échelle mondiale.

Les gaz

Afin de déterminer comment de meilleures pratiques agricoles peuvent améliorer la qualité de l'air, il faut passer en revue les processus d'échange de GES – CO_2, N_2O et CH_4 – dans l'atmosphère. Étant donné que ces processus sont souvent liés les uns aux autres, nous étudierons d'abord chaque gaz séparément.

Dioxyde de carbone

Dans la nature, le carbone sert à stocker de l'énergie. Dans l'atmosphère, le carbone est surtout présent sous forme de CO_2. Pendant la photosynthèse, les végétaux utilisent l'énergie du soleil pour absorber le CO_2 et produire des glucides (sucres) et d'autres formes riches en énergie. Les matières végétales sont alors ingérées par d'autres organismes – microorganismes, vaches et humains, par exemple – qui, en fait, les transforment à nouveau en CO_2 en utilisant l'énergie solaire qu'elles contiennent pour assurer leur survie et leur croissance. Certaines matières carbonées hautement énergétiques peuvent être stockées pendant des milliers ou des millions d'années avant de se retransformer en CO_2. Par exemple, les sols renferment une grande quantité de carbone sous forme de matière organique (humus), et le carbone des combustibles fossiles, tels que le charbon, le pétrole et le gaz naturel, provient de l'énergie solaire emmagasinée par les plantes il y a des millions d'années. Les exploitations agricoles et les autres écosystèmes sont comparables à des piles; le stockage de carbone s'apparente à la charge d'une pile et la déperdition, à la décharge.

Sur les fermes canadiennes, le carbone est principalement emmagasiné dans la matière organique des sols. La quantité stockée varie selon le taux de carbone accumulé dans la litière végétale, comparativement au taux libéré lors de la décomposition. Si l'apport de carbone est supérieur aux pertes, le carbone s'accumule; si l'apport est inférieur aux pertes, le carbone s'épuise.

Par le passé, lorsque les terres étaient mises en culture pour la première fois, de grandes quantités de carbone étaient libérées, la culture accélérant le processus de décomposition, et les récoltes diminuant l'apport de carbone dans les sols. De nos jours toutefois, les agriculteurs peuvent reconstituer une partie des stocks de carbone perdus en recourant à de meilleures pratiques agricoles : ils utilisent des méthodes de culture sans labour (semis direct), sèment davantage de plantes fourragères vivaces ou de plantes de pâture, évitent la mise en jachère (terre laissée sans culture), ajoutent des éléments nutritifs et du fumier pour accroître le rendement, restaurent les zones herbagères et emploient de meilleures méthodes pastorales. En augmentant la quantité de carbone stockée dans les sols, ces pratiques non seulement éliminent le CO_2 de l'atmosphère, mais elles améliorent la productivité et la résistance des sols au bénéfice des générations futures. Certaines pratiques, telles que la culture sans labour, réduisent aussi les émissions de CO_2 en faisant diminuer l'utilisation de combustibles fossiles.

Méthane

Parfois, lorsque les matières carbonées se décomposent dans un milieu pauvre en oxygène, les microorganismes libèrent du CH_4 plutôt que du CO_2. Sur les fermes canadiennes, cela se produit principalement de deux façons. Premièrement, le CH_4 est produit à l'intérieur de la panse (secteur gastrique antérieur) des ruminants, comme le bœuf et le mouton, au cours de la *fermentation entérique*. Ce processus, qui constitue la plus grande source de CH_4 d'origine agricole au Canada, est important, car il permet aux animaux d'élevage de transformer les matières non digestibles, telles que l'herbe et le foin, en énergie utilisable. Deuxièmement, le CH_4 est libéré des sites d'entreposage du fumier, particulièrement lorsque le fumier est humide ou boueux lors de son entreposage, car l'eau empêche l'entrée d'oxygène lors de la décomposition.

Les scientifiques étudient les émissions de CH_4 des ruminants depuis longtemps, car de telles émissions signifient que les animaux n'ont pas utilisé efficacement l'énergie contenue dans leur nourriture pour produire du lait ou de la viande. Par le biais de la recherche, les scientifiques ont trouvé des moyens efficaces pour réduire ces émissions. Le premier consiste à modifier le régime alimentaire des animaux d'élevage : utilisation de rations à forte teneur en céréales, ajout d'huiles ou de matières grasses aux rations et recours à des agents antimicrobiens appelés ionophores, qui réduisent les émissions, du moins pour un certain temps. Le fait de nourrir les bovins avec du fourrage de qualité supérieure – en remplaçant le foin par de la luzerne, par exemple – peut également faire diminuer les émissions de CH_4 par unité de produit animal. De plus, les scientifiques ont expérimenté des

substances telles que les tanins, naturellement présents dans certains fourrages, dans le but d'éliminer le CH_4. Divers autres agents, dont les levures, les acides organiques, les composés halogénés, comme le chloroforme, et des vaccins possibles sont également examinés, mais, dans certains cas, leur efficacité pour réduire les émissions n'est toujours pas largement reconnue.

Outre ces méthodes *directes*, il est possible de réduire les émissions de CH_4 *indirectement* en recourant à des pratiques qui accroissent la productivité : période de lactation prolongée des vaches laitières, élevage d'espèces plus rentables, amélioration de la performance reproductive et augmentation du taux d'engraissement des bovins pour qu'ils atteignent le marché plus rapidement. Ces pratiques, même si elles ne réduisent pas les émissions quotidiennes par animal, peuvent faire diminuer les émissions de CH_4 par kilogramme de lait ou de viande produit.

Les recherches ont également montré qu'il est possible de réduire les émissions de CH_4 provenant du fumier. Les pratiques suivantes sont parfois efficaces : aération du fumier, entreposage du fumier à basse température (au-dessous de la température du sol, par exemple), élimination plus fréquente du fumier entreposé, utilisation de systèmes de litière pour améliorer l'aération et compostage du fumier (toutefois, dans l'ensemble, l'efficacité de cette pratique est variable, en partie à cause des émissions possibles de N_2O). Un autre moyen de réduire les émissions provenant du fumier est d'éliminer le CH_4 en utilisant des biofiltres ou, encore mieux, de récupérer le CH_4 pour s'en servir comme carburant et, par le fait même, remplacer les combustibles fossiles qui auraient autrement été nécessaires.

Oxyde nitreux

L'oxyde nitreux est un important GES produit par les exploitations agricoles au Canada; il représente environ la moitié de l'effet de réchauffement attribuable aux émissions agricoles. Ce gaz, que nous connaissons comme gaz hilarant, est produit naturellement lors de la transformation de l'azote dans les sols par les microorganismes.

Tous les sols libèrent une certaine quantité de N_2O, mais les sols agricoles en produisent souvent plus que les autres en raison de l'apport d'azote dans le sol par les engrais, le fumier et d'autres amendements. Sans ces apports, qui permettent de remplacer l'azote éliminé par la récolte des grains, du lait, de la viande et d'autres produits, le rendement des cultures diminuerait rapidement. Cependant, plus la quantité d'azote ajouté augmente, plus les pertes possibles dans l'environnement augmentent aussi, y compris les pertes d'azote dans l'atmosphère sous forme de N_2O. Selon les scientifiques, environ 1 % de l'azote ajouté dans les champs est, en général, libéré sous forme de N_2O. Toutefois, ce pourcentage peut varier grandement suivant la teneur du sol en eau (par conséquent, sa teneur en oxygène), la topographie du terrain et la teneur du sol en argile.

En plus d'être une source directe de N_2O, les sols agricoles peuvent également entraîner des *émissions indirectes* – partout ailleurs, le N_2O provenant de l'azote est lessivé des champs ou libéré dans l'atmosphère sous forme d'ammoniac anhydre. Cet azote, une fois qu'il a quitté la ferme, se frayera un chemin dans les milieux avoisinants où il se transformera et s'échappera sous forme de N_2O. Bien qu'il ne soit pas issu des exploitations agricoles, ce N_2O provient de l'azote utilisé sur la ferme et, par conséquent, il doit être considéré comme un dérivé des activités agricoles.

Étant donné que le N_2O résulte en grande partie de l'excédent d'azote dans les sols, une façon d'éliminer ses émissions est d'épandre les engrais judicieusement : il est préférable d'en ajouter suffisamment, mais sans plus, au bon endroit et au bon moment, pour répondre aux besoins des cultures et éviter d'avoir des surplus considérables. Cet objectif, que les scientifiques ont tenté d'atteindre pendant longtemps, devient d'autant plus important compte tenu du coût élevé des engrais et des dommages environnementaux causés par les émissions d'azote provenant des exploitations agricoles. Il serait possible d'utiliser les engrais plus efficacement : en adaptant les taux d'épandage aux besoins des végétaux; en épandant les engrais près des racines des plantes (mais pas trop profondément dans le sol); en appliquant les engrais plusieurs fois par année, plutôt qu'une seule fois; en utilisant des engrais à libération lente. De même, une bonne utilisation du fumier peut également limiter les émissions de N_2O – une quantité moindre émanera du fumier et moins d'engrais sera nécessaire. Le moyen le plus efficace de réduire les émissions de N_2O issues du fumier est peut-être de modifier, d'abord et avant tout, les rations alimentaires afin de minimiser l'excrétion d'azote dans l'urine et les matières fécales.

La diminution des émissions de N_2O d'origine agricole est parfois possible par d'autres pratiques, dont les suivantes : utilisation accrue de légumineuses comme source d'azote; utilisation de cultures couvre-sol (semées entre deux cultures successives) pour éliminer l'excédent d'azote; suppression, dans la mesure du possible, de la mise en jachère (laisser la terre sans culture, sans absorption d'azote par les récoltes, le temps d'une saison); ajustement de l'intensité du travail du sol (quelquefois, mais pas systématiquement, la culture sans labour peut réduire les émissions).

La plupart des méthodes de réduction des émissions de N_2O s'appuient sur une efficacité accrue de l'utilisation de l'azote sur les fermes. La réalisation de progrès dans cette direction offre beaucoup d'autres avantages : amélioration de la rentabilité des exploitations agricoles (car le coût des engrais est élevé); réduction de la consommation de combustibles fossiles (et, par conséquent, des émissions de CO_2), étant donné que la production d'engrais azoté requiert une forte intensité d'énergie; diminution de la quantité de nitrates, d'ammoniac et d'autres polluants azotés qui pénètrent dans l'environnement. En dépit de progrès importants, le cycle de l'azote est toujours bien en place sur les exploitations agricoles et son élimination reste une priorité pour les chercheurs afin de réduire les émissions de N_2O et pour beaucoup d'autres raisons urgentes.

Les quantités

Comment et pourquoi les scientifiques mesurent-ils les émissions?

Nous mesurons les émissions de GES d'origine agricole en partie pour respecter nos engagements internationaux; par exemple, le Canada doit fournir des estimations annuelles fiables des émissions pour l'ensemble de ses sources majeures, y compris les exploitations agricoles. Toutefois, ces émissions sont également mesurées pour des raisons d'ordre scientifique : s'il nous est impossible de les quantifier avec précision, comment pouvons-nous déterminer quelles sont les meilleures pratiques pour les réduire? Et sans estimations fiables des émissions, comment nous serait-il possible de comprendre les principes fondamentaux de formation et de libération des GES?

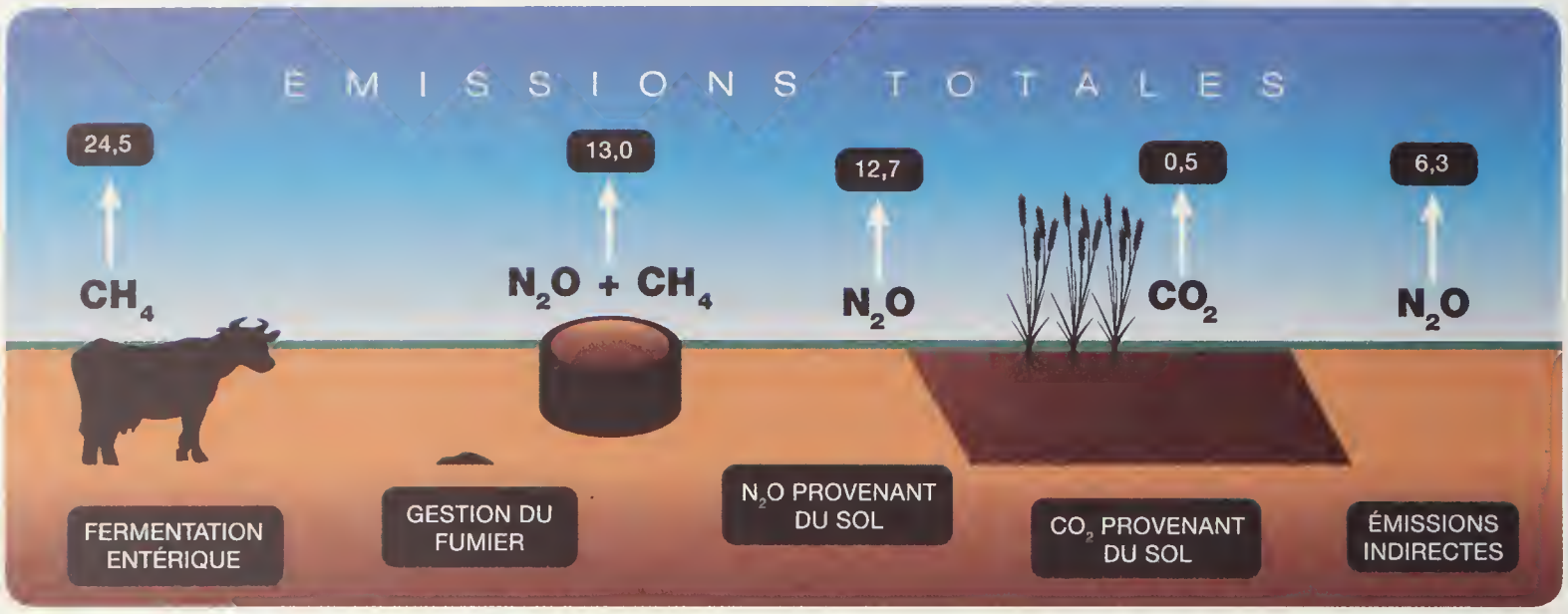
Cependant, il n'est pas facile de mesurer les émissions de GES d'origine agricole, puisqu'elles proviennent d'un bon nombre d'éléments qui se trouvent sur la ferme : les sols, les animaux de toutes sortes et l'équipement. Parfois, les gaz retournent lentement dans l'atmosphère et, d'autres fois, ils s'échappent sporadiquement en rafales. Afin de capter ces émissions, les scientifiques ont dû concevoir diverses méthodes, dont les suivantes : petites enceintes placées sur le sol ou grandes enceintes pouvant abriter des vaches; tours instrumentées érigées en aval des champs ou avions instrumentés volant au dessus des régions agricoles; méthodes requérant une analyse minutieuse du devenir du carbone dans les sols pendant plus d'une dizaine d'années, ou mesures du CO_2 dans l'air plusieurs fois par seconde; analyse de l'air dans des tubes enfouis dans le sol ou suspendus à des ballons haut dans les airs. Aucune méthode n'est parfaite, mais chacune joue un rôle précis. En mettant en commun les résultats obtenus pour toutes ces méthodes, les scientifiques peuvent estimer les émissions de façon satisfaisante et déterminer les facteurs qui les causent. Ensuite, les corrélations à établir sont généralement explicitées dans les *modèles* – ensembles d'équations mathématiques qui permettent de déterminer les émissions de GES, peu importe les paramètres. Ces modèles sont déjà largement utilisés, mais les chercheurs les perfectionnent toujours pour augmenter leur robustesse et leur fiabilité.

Nos émissions

Le trois GES – le CO_2, le CH_4 et le N_2O – sont produits (et quelquefois éliminés) par le secteur agricole (figure 1). Bien qu'ils diffèrent, ces gaz ont tous la capacité de retenir la chaleur. Tonne pour tonne, le CH_4 est plus de 20 fois plus efficace pour emprisonner la chaleur que le CO_2, et le N_2O est environ 300 fois plus efficace que le CO_2. Par conséquent, afin de comparer les émissions de ces gaz, nous parlons habituellement d'équivalents CO_2 (par exemple, le N_2O correspond à 298 équivalents CO_2).

FIGURE 1

Sources d'émissions de GES du secteur agricole au Canada en 2005, excluant les émissions de CO2 associées à l'utilisation de l'énergie (Mt CO_2e)



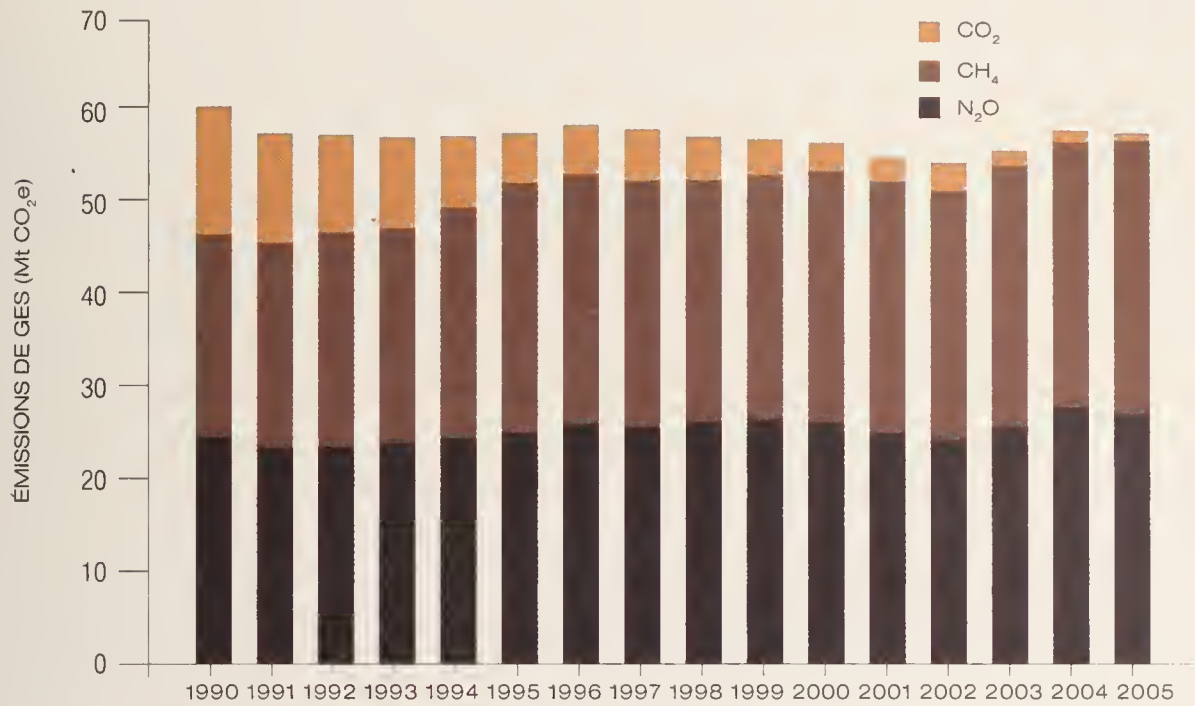
En 2005, le Canada a produit 747 millions de tonnes d'équivalents CO_2 (Mt CO_2e) pour l'ensemble de ses sources, principalement sous forme de CO_2 provenant de l'utilisation de l'énergie. L'agriculture est responsable d'environ 8 % de ces émissions, en grande partie de CH_4 et de N_2O en proportions sensiblement égales. (Ce pourcentage n'inclut pas les émissions attribuables à la consommation d'énergie. Si ces dernières étaient comprises, le secteur agricole serait alors responsable de plus ou moins 10 % des émissions canadiennes.) Tel que mentionné précédemment, les sols agricoles permettent d'*éliminer* une quantité considérable de CO_2 de l'atmosphère lorsque des pratiques améliorées d'absorption du carbone sont mises en place (environ 10 Mt CO_2e ont été éliminées en 2005). Toutefois, étant donné que la quantité éliminée contrebalance presque exactement les pertes de carbone des terres forestières récemment cultivées, l'échange net de CO_2 entre les terres agricoles et l'atmosphère est minime.

Les émissions annuelles totales de GES produits par les exploitations agricoles canadiennes sont restées passablement stables de 1990 à 2005, avec une baisse de 6 % (figure 2). Cependant, cette stabilité camoufle les tendances réelles de certains gaz en particulier. Les émissions de méthane, par exemple, se sont accrues de 24 % en raison de l'augmentation de la taille des troupeaux (le nombre de bovins de boucherie a augmenté de 30 %). Les émissions d'oxyde nitreux ont augmenté de 14 %, surtout en raison du recours accru aux engrais et d'une plus grande production de fumier. Même si les émissions de CO_2 des terres cultivées ont diminué, les émissions totales n'ont que légèrement décliné.

Il est possible que ces estimations ne soient pas parfaitement exactes. Elles sont toutes entachées d'un certain degré d'incertitude, particulièrement celles concernant le N_2O. Toutefois, elles fournissent des renseignements fiables sur les tendances générales, et leur degré d'incertitude se réduira peut-être lentement avec des recherches supplémentaires et l'amélioration graduelle des méthodes.

FIGURE 2

ÉMISSIONS DE DIOXYDE DE CARBONE, DE MÉTHANE ET D'OXYDE NITREUX ATTRIBUABLES AU SECTEUR AGRICOLE CANADIEN, 1990 À 2005



Qu'adviendra-t-il des émissions de GES dans les années à venir? Étant donné la demande grandissante d'aliments et d'autres produits, il n'est pas exclu que le nombre d'animaux d'élevage et les apports d'azote augmentent encore, ce qui accroîtra vraisemblablement les émissions de CH_4 et de N_2O, à moins que de nouveaux moyens ne permettent de les éliminer. Les apports de carbone dans le sol (élimination du CO_2 atmosphérique), qui ont contrebalancé l'augmentation des émissions passées de CH_4 et de N_2O, se poursuivront peut-être pour quelques années encore, mais pas indéfiniment; tôt ou tard, ces apports atteignent leur maximum, généralement quelques décennies après l'adoption de nouvelles pratiques. Par conséquent, même avec de bonnes pratiques, il est difficile de prévoir une baisse appréciable des émissions de GES d'origine agricole au fil des ans. Il serait peut-être plus important de trouver des moyens de réduire les émissions par unité de produit que de réduire les émissions totales. Par exemple, au cours des 15 dernières années, les exploitants de ferme laitière ont abaissé les émissions de CH_4 d'environ 13 % par kilogramme de lait, et des tendances similaires ont été observées chez les producteurs de bœufs et de porcs.

Estimation du bilan total

Les pratiques agricoles ont un effet sur le climat non seulement par le biais des émissions de GES, mais également par l'incidence qu'elles ont sur la couleur des terres. En général, plus le paysage est blanc, plus les rayons du soleil sont réfléchis dans l'espace. Par exemple, un champ couvert de neige réfléchira plus de rayons (et absorbera moins de chaleur) qu'une forêt dont le sol est enneigé mais dont le couvert est toujours foncé. Les pratiques culturales peuvent également influer sur la fréquence des orages et le temps violent en modifiant la quantité de la vapeur d'eau qui s'échappe des stomates des plantes (transpiration). De plus, des pratiques telles

que la mise en jachère et l'irrigation peuvent avoir un impact sur la température de l'air et les précipitations. Ces exemples montrent donc qu'il est impossible d'estimer les effets des pratiques agricoles sur le climat d'après les seules émissions de GES, puisque d'autres facteurs doivent également être pris en considération.

La situation dans son ensemble

Une perspective holistique

Un écosystème, ou *système écologique*, est une communauté formée d'organismes et de leur environnement, qui est caractérisée par toutes leurs interactions. L'écosystème représente donc beaucoup plus que la somme de ses parties : il assure la parfaite cohérence du système en entier. L'étude des écosystèmes n'est donc pas une tâche facile. Elle requiert souvent l'intervention de différentes disciplines et doit couvrir de longues périodes, puisque les écosystèmes changent souvent, mais de façon progressive. Par contre, cette approche nous permet d'envisager les systèmes vivants comme un tout et de discerner la forêt des arbres.

En premier lieu, le concept d'écosystème a surtout été appliqué aux paysages non modifiés par l'être humain. Toutefois, les exploitations agricoles peuvent également être considérées comme des écosystèmes, car elles forment un assemblage complexe d'organismes qui interagissent entre eux et avec leur environnement. Le fait d'envisager les fermes de cette façon comporte plusieurs avantages : cela nous oblige à nous situer dans une perspective *holistique* et facilite l'étude des fermes en tant que systèmes naturels, tout comme les forêts, les milieux humides et les lacs.

L'approche écosystémique peut être particulièrement utile pour l'étude des émissions de GES. Nous pourrions même soutenir que c'est la *seule* façon de les étudier, comme c'est le cas pour les flux de GES qui proviennent d'innombrables processus, tous reliés les uns aux autres. Les émissions d'un gaz dépendent de celles d'autres gaz. Par exemple, certaines pratiques peuvent favoriser la séquestration du carbone dans le sol et éliminer par le fait même le CO_2 de l'atmosphère. Toutefois, si ces pratiques requièrent davantage d'engrais, les émissions de N_2O seront modifiées, et quel en sera l'effet *net*? Même si une nouvelle pratique d'alimentation pouvait éliminer efficacement les émissions de CH_4 par les vaches, comment pourrions-nous déterminer son impact sur les émissions de GES du fumier produit, et la quantité d'émissions de GES provenant des champs où ces aliments seraient cultivés? Les réactions en chaîne de toute nouvelle pratique sont encore plus compliquées. Par exemple, si une terre qui a été cultivée était engazonnée, est-ce que les plantes cultivées qui s'y trouvaient seraient simplement déplacées autre part? Et quelles seraient les émissions à cet endroit? Ces quelques exemples montrent qu'une bonne compréhension des émissions de GES doit s'appuyer sur une perspective écosystémique globale et que l'efficacité de pratiques proposées n'est mesurable qu'en examinant tous les gaz dans le temps et dans l'espace.

Compte tenu de cette complexité, comment pouvons-nous étudier tous ces processus interreliés qui entraînent des émissions de GES d'origine agricole?

Le seul moyen pratique est de construire des modèles mathématiques, c'est-à-dire des équations qui décrivent, en langage mathématique, ce que nous connaissons du système. La construction de ces modèles, qu'ils soient simples ou ultraperfectionnés, nous oblige à inclure et à relier entre eux tous les processus concernés. De plus, les modèles permettent de consigner nos connaissances et de les mettre à jour. Au fur et à mesure que des constatations sont faites, elles peuvent être exprimées dans des modèles améliorés. Enfin, l'élaboration de ces modèles nous aide à reconnaître notre ignorance et, par le fait même, à signaler aux scientifiques les secteurs qui exigent davantage de recherches.

Des scientifiques du ministère de l'Agriculture et de l'Agroalimentaire du Canada travaillent actuellement à l'élaboration de tels modèles afin de simuler les émissions de GES pour l'ensemble des activités agricoles. Un de ces modèles, une simple calculatrice qui prévoit les émissions annuelles de GES, est maintenant à la disposition des scientifiques, des producteurs, des décideurs et d'autres utilisateurs. L'élaboration de modèles *dynamiques* et plus perfectionnés, qui simuleront l'évolution des émissions dans le temps, est également en cours.

Les émissions de gaz à effet de serre constituent seulement le premier point d'intérêt de ces modèles écosystémiques et servent simplement de point de départ utile et approprié. Au fil du temps, il faudra peut-être prendre également en compte d'autres dimensions environnementales, telles que la biodiversité, la qualité de l'eau, la qualité des aliments, les sources d'énergie de remplacement, les émissions d'ammoniac et d'autres questions qui nous échappent encore. Une fois que les processus sous-jacents au carbone, aux éléments nutritifs et aux flux d'énergie sont inscrits dans un modèle écosystémique, ce dernier peut être rajusté et réorienté pour faire la lumière sur ces dimensions et sur d'autres impératifs sociétaux.

Écoservices

Comme tous les écosystèmes, les exploitations agricoles procurent beaucoup d'avantages et un bon nombre d'*écoservices*. Certains de ces services sont évidents : les fermes nous fournissent des aliments, des fibres et maintenant même du carburant. D'autres sont plus subtils, mais tout aussi importants : les fermes agissent comme des filtres environnementaux, en purifiant l'air et l'eau et en éliminant les déchets. De plus, elles constituent l'habitat d'êtres humains et d'autres formes de vie, assurent la subsistance des familles rurales, nous donnent un vaste espace de jeu et nous remontent le moral grâce à leur beauté esthétique.

L'énumération des écoservices fournis par les exploitations agricoles amène souvent ceux qui étudient les changements climatiques à penser d'abord et avant tout à la réduction des émissions de GES. Il est vrai que ce rôle est d'une grande importance, car les exploitations agricoles peuvent *éliminer* le CO_2 atmosphérique. Cependant, ce n'est qu'un service parmi beaucoup d'autres, et il se peut qu'il ne soit même pas reconnu comme hautement prioritaire. Peu de pratiques d'atténuation des GES seront adoptées si elles ne remplissent pas également d'autres fonctions, telles que la réduction des coûts, l'amélioration de la conservation ou l'enrichissement de la

biodiversité. Les scientifiques examinent donc surtout les pratiques qui permettent de réduire les GES *et* d'améliorer les autres écoservices. La culture sans labour (semis direct) est une de ces possibilités *gagnantes*. Dans certains cas, en plus de réduire les émissions de GES, cette dernière peut permettre de faire diminuer les coûts, de conserver les sols en prévenant l'érosion, d'offrir des habitats de nidification grâce à l'amélioration de la couverture végétale et d'accroître la qualité de l'air en empêchant les tempêtes de poussière. En réalité, l'adoption répandue de la culture sans travail du sol s'explique, sans aucun doute, en plus grande partie par ces avantages que par son efficacité à réduire les GES.

Les cultures sans labour sont par contre très rares. Il arrive souvent qui soit nécessaire de sacrifier un service pour obtenir un gain ailleurs. À vrai dire, il est même possible que la culture sans travail du sol exige des coûts à un certain moment. Le choix des pratiques occasionne donc souvent des compromis, car le but est de saisir des occasions de *gros gains/petites pertes*. Par exemple, sommes-nous disposés à assumer de légères pertes de rendement (petites pertes) pour arriver à réduire considérablement les GES (gros gains)? Ou à accepter un léger accroissement des émissions de CH_4 pour augmenter substantiellement la production laitière? Ou à consentir à un léger accroissement des émissions d'ammoniac pour réduire considérablement les émissions de N_2O? Ajoutez à cela tous les autres écoservices, et la prise de décision devient encore plus étourdissante.

De toute évidence, le choix des meilleures pratiques doit être fondé sur une approche holistique afin d'examiner tous les écoservices, de déterminer la valeur à leur accorder et d'opter pour le meilleur compromis. Les conseils des scientifiques ne suffisent pas dans le cadre d'une telle approche. La prise de décision appartient à la société dans son ensemble et doit être éclairée par tous ceux qui vivent et dépendent de ces terres agricoles.

L'étude des GES contribuera peut-être à la réduction des émissions, mais il est bien possible que nous en retirions aussi de plus grands avantages. En effet, les GES nous renseignent également sur le fonctionnement de l'écosystème. Des pics de N_2O, par exemple, indiquent qu'il y a potentiellement une interférence dans le cycle de l'azote; des émissions élevées de CH_4 peuvent révéler une utilisation inefficace des aliments pour animaux; des émissions excessives de CO_2 peuvent être un indice de l'épuisement des stocks de carbone ou d'une utilisation peu judicieuse de l'énergie. Nos fermes et notre planète sont sur le point de subir des bouleversements : des changements touchant les conditions climatiques, la disponibilité de l'eau, la consommation d'énergie et la demande alimentaire mondiale, pour n'en nommer que quelques-uns. Compte tenu de ces changements à venir, nous devons trouver des moyens pour s'enquérir de l'état de notre écosystème et prendre son pouls. La mesure des GES est une méthode utilisée à cette fin. De telles méthodes peuvent nous amener à améliorer les pratiques agricoles et la qualité de l'air.

L'avenir

La promesse des biocarburants

Les exploitations agricoles, et les attentes de la société envers ces dernières, sont en constante évolution. Récemment, l'intérêt soudain pour le développement des biocarburants a incité au changement. L'être humain a longtemps utilisé la biomasse pour tirer de l'énergie en se servant, par exemple, du bois ou des résidus de culture comme combustibles. Aujourd'hui, les nouvelles technologies et les coûts croissants des combustibles fossiles ont fait naître un intérêt pour d'autres catégories de carburants issues des cultures. La technique de production d'éthanol, obtenu à partir du maïs ou du blé, est la plus avancée. Au Canada, lorsque la construction des usines de transformation sera terminée, l'éthanol produit à partir de céréales représentera environ 2 % de la consommation d'essence automobile. Bien qu'elle soit moins perfectionnée, la technique de transformation de la biomasse cellulosique – du panic raide, de la biomasse forestière et des résidus de culture – en éthanol présente peut-être un plus grand potentiel à long terme. Il est possible d'utiliser d'autres biocarburants, comme le biodiesel, fait à partir d'huile de soja ou de colza, le biogaz (CH_4) provenant de fumier ou de matières organiques traités par digestion, ou les biocombustibles, issus du brûlage de la biomasse des arbres, des graminées ou des résidus de culture, afin de générer de la chaleur, de la vapeur ou de l'électricité.

Ces cultures dédiées aux biocarburants peuvent contribuer à la réduction des émissions des GES. Le brûlage de biocarburants libère également du CO_2, mais, puisque ce dernier provient du carbone récemment absorbé de l'atmosphère par les cultures, il est *recyclé* au lieu d'être *libéré* dans l'atmosphère comme c'est le cas lors du brûlage de combustibles fossiles. Par contre, la production de biocarburants peut entraîner l'émission de certains GES (la culture du maïs peut produire des émissions de N_2O, par exemple). Il faudra donc soustraire ces émissions lors de l'estimation des avantages nets du brûlage de biocarburants.

D'autres facteurs entrent en jeu lors de l'analyse de l'ensemble des avantages des biocarburants. Par exemple, une élimination accrue du carbone récupéré aura-t-elle une incidence sur la qualité du sol, qui est tributaire de la litière végétale pour reconstituer la matière organique? Les plantes qui se trouvaient sur les terres désormais dédiées aux biocarburants seront-elles cultivées autre part, où elles auront peut-être un plus grand impact sur l'environnement? Il ne s'agit là que de quelques-unes des questions qui font ressortir la nécessité de s'ouvrir à une perspective holistique afin d'évaluer les effets des pratiques proposées à l'échelle du système.

Régénérer l'air

Les scientifiques s'entendent pour dire que les changements climatiques imminents représentent un important défi qui mérite une intervention concertée à l'échelle planétaire. Toutefois, la formulation des politiques qui serviront à relever ce défi n'est pas une tâche facile, en partie parce que nous ne connaissons pas exactement l'ampleur des changements à venir et la rapidité à laquelle ils surviendront. Les efforts internationaux pour lutter contre les changements climatiques ont commencé en 1979, avec la première Conférence mondiale sur le climat, tenue à Genève. Ces efforts ont été renforcés en 1988 grâce à la constitution du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), qui a déposé son premier rapport d'évaluation en 1990. (Son quatrième rapport est paru en 2007.)

Le premier rapport du GIEC a mené à un accord international sur les changements climatiques, la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, qui a été adoptée par 192 pays. La Convention vise à stabiliser la concentration de GES à des niveaux inférieurs à ceux qui seraient susceptibles de causer de dangereux changements climatiques. La concrétisation de cet objectif repose sur le *principe de précaution*, l'idée qu'il nous est impossible d'attendre d'avoir la certitude complète avant de prendre les bonnes mesures pour empêcher les dommages irréversibles qui pourraient survenir dans l'avenir. Les négociations internationales prolongées ont débouché sur le Protocole de Kyoto, qui vise une réduction de 5 % des émissions annuelles de GES entre 2008 et 2012, comparativement à celles de 1990. Les pays peuvent remplir leurs engagements respectifs de deux façons : en réduisant les émissions ou en créant des puits de carbone biologiques pour accroître les stocks de carbone dans les arbres ou les sols.

Le Canada a ratifié le Protocole de Kyoto en 2002, ce qui a eu des répercussions profondes sur les exploitations agricoles. L'intérêt accru pour le stockage du carbone dans le sol a été un des effets importants et a été perçu comme un élément majeur de l'engagement du Canada dans la réduction de l'ensemble des émissions.

Scénarios possibles

Dans 50 ans, le monde de nos petits-enfants ne ressemblera probablement plus à celui que nous connaissons aujourd'hui. Il est bien possible que le changement climatique soit un des changements importants à venir. Selon les modèles climatiques, un réchauffement graduel est prévu au cours des prochaines décennies. En raison de sa latitude élevée, le Canada connaîtra des augmentations de température qui seront vraisemblablement plus prononcées que la moyenne mondiale. Les quantités des précipitations risquent également de changer, quoique les estimations soient plus incertaines que celles concernant la température. Étant donné que l'agriculture est très sensible au climat, il n'est pas exclu que ces changements modifient notre façon de cultiver les terres et le mode de

fonctionnement de ces dernières. De plus, ils sont susceptibles d'avoir un effet sur nos cultures, sur la conception de nos établissements d'élevage, sur la résistance de nos sols et sur le contrôle des organismes nuisibles. Tout changement à venir aura peut-être une incidence sur la quantité des émissions de GES, ce qui exigera la prise de nouvelles mesures pour les atténuer. Par conséquent, en plus d'éviter les émissions là où c'est possible, nous devons également être disposés à nous adapter aux changements qui risquent de se produire.

Toutefois, les changements ne se limiteront pas seulement au climat. En réalité, d'autres stress pourraient même entraîner de plus grandes transformations. En raison de l'accroissement de la population mondiale, qui atteindra peut-être neuf milliards d'habitants d'ici 2050, les demandes de nourriture augmenteront malgré la quantité limitée de terres, la demande d'eau s'accroîtra même si les réserves diminueront, les besoins en énergie augmenteront malgré l'épuisement des stocks, et des intérêts divergents se disputeront de plus en plus l'espace. Ces pressions imminentes exigent une vision cohérente à long terme afin de trouver des moyens de réduire les émissions de GES, tout en assurant la prestation des nombreux autres écoservices que nous attendons des exploitations agricoles.

Une vision restaurée – futures solutions rêvées

Comme nous l'avons vu, les scientifiques ont réalisé d'importants progrès récemment en ce qui touche la compréhension des émissions de GES d'origine agricole et les moyens de les réduire. Par contre, la mise en place de solutions n'est pas totalement terminée, compte tenu particulièrement des stress imminents. Les scientifiques continueront donc de chercher des réponses à ces questions et à de nouvelles questions encore inconnues. Ils rechercheront éventuellement des sources d'énergie de remplacement et trouveront des moyens d'utiliser l'énergie plus efficacement sur les exploitations agricoles : par le biais de la fixation de l'azote biologique, par exemple, ou du recyclage des éléments nutritifs des fermes, y compris les éléments nutritifs provenant de notre nourriture.

Quelle que soit notre façon d'intervenir, nos efforts devraient se concentrer sur la reconstitution du lien entre les consommateurs et la terre. Ainsi, nous pourrions nous rappeler que la situation des terres agricoles nous touche tous profondément et que, par ailleurs, notre comportement en tant que consommateur a une profonde incidence sur la terre. L'émergence d'une telle conception, éclairée par l'approche écosystémique, inciterait les scientifiques à chercher des solutions non seulement en laboratoire et sur le terrain, mais également dans les leçons tirées de l'histoire, dans leur perception de l'art et dans la sagesse de ceux qui cultivent les terres.

De meilleures réponses naîtront peut-être d'une vision restaurée : considérons nos terres agricoles non pas comme une ressource à exploiter, mais comme une demeure que nous partageons tous, que nous y résidions ou pas.

Introduction

LE CHANGEMENT DE NOTRE CLIMAT

L'air qui nous entoure change. Sa concentration en CO_2 (dioxyde de carbone), qui a déjà été de 280 parties par million (ppm), dépasse maintenant les 380 ppm et poursuit rapidement sa montée (figure 3). Nous savons maintenant avec certitude que cette évolution résulte pour l'essentiel de l'activité humaine; elle porte notre empreinte.

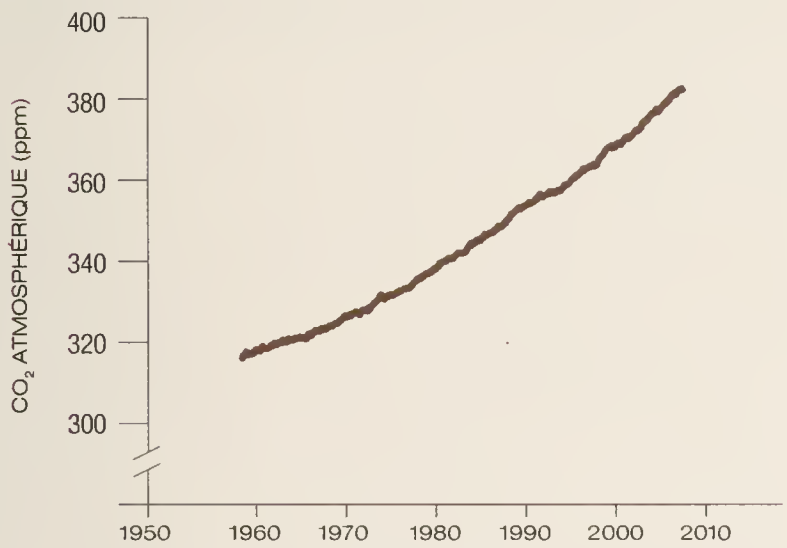
Chaque année, nous émettons dans l'air près de 9 milliards de tonnes de carbone, principalement parce que nous brûlons du pétrole, du gaz et du charbon (figure 4), mais aussi des forêts, surtout dans les tropiques. Ainsi, chaque année, la concentration de CO_2 dépasse d'environ 2 ppm celle de l'année précédente. Rien ne laisse présager que cette croissance ralentira; durant des dizaines d'années encore, nos sociétés dépendront des combustibles fossiles pour produire de l'énergie.

Nous n'avons pas de perception immédiate des changements qui se produisent dans notre atmosphère. Le dioxyde de carbone est incolore, inodore et n'est aucunement toxique aux concentrations actuelles; les végétaux en ont même besoin pour croître. Néanmoins, la hausse rapide des concentrations est inquiétante, car le CO_2 est un gaz à effet de serre (GES) : sa présence dans l'atmosphère contribue à ralentir la dissipation de la chaleur dans l'espace. À bien des égards, il s'agit là d'une bonne chose; sans l'effet de serre, notre planète serait un endroit glacial et sans vie (figure 5). Mais, si les quantités de CO_2 continuent d'augmenter – elles doubleront peut-être d'ici la fin du siècle –, la planète pourrait se réchauffer considérablement. Il y a déjà des signes que les températures mondiales ont grimpé et, selon certains modèles, le réchauffement sera plus prononcé dans l'avenir.

Pourquoi est-ce important? Si le climat se réchauffe, le niveau de la mer s'élèvera, parce que la chaleur fera augmenter le volume de l'eau et fondre les glaces terrestres, qui viendront grossir les océans. Comme beaucoup de gens habitent sur leurs rives, une augmentation même légère de niveau – bien inférieure à un mètre – inonderait de grandes régions qui sont actuellement habitées. Le réchauffement pourrait modifier la configuration des pluies et rendre plus courants les événements météorologiques graves. Comme l'explique la figure 6, les changements climatiques pourraient avoir une incidence sur une foule de besoins fondamentaux des humains, notamment la production alimentaire, la santé, la biodiversité et l'accès à l'eau. Tous les effets ne seraient pas négatifs, mais beaucoup pourraient l'être. Une grande incertitude demeure quant à ce que l'avenir nous réserve, et cette incertitude est elle-même une source d'inquiétudes, puisqu'il est plus difficile de nous préparer aux changements à venir.

FIGURE 3

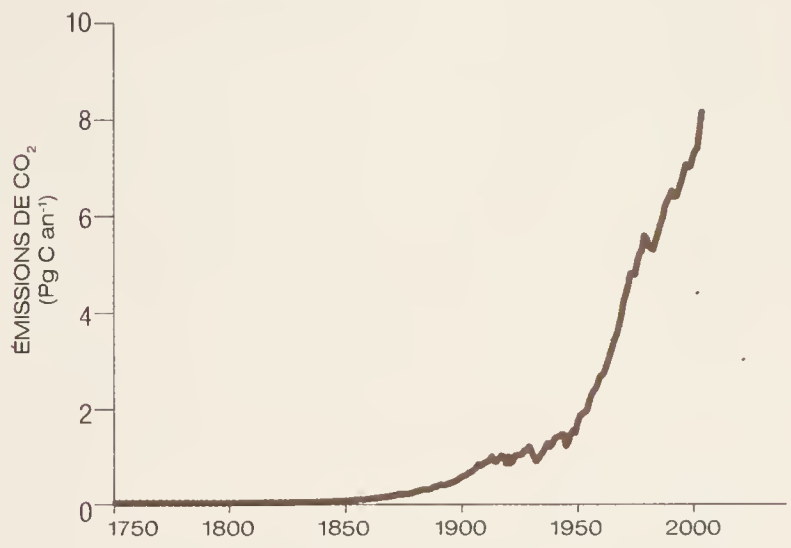
AUGMENTATIONS DE LA CONCENTRATION DE CO_2 DANS L'ATMOSPHÈRE (CONCENTRATIONS DE CO_2 ATMOSPHÉRIQUE MESURÉES À MAUNA LOA, À HAWAII)



Source : Keeling, C.D., S.C. Piper, R.B. Bacastow, M. Wahlen, T.P. Whorf, M. Heimann et H.A. Meijer. *Exchanges of atmospheric CO_2 and $^{13}CO_2$ with the terrestrial biosphere and oceans from 1978 to 2000.* I. Global aspects, SIO Reference Series, No. 01-06, Scripps Institution of Oceanography, San Diego, 88 pages, 2001. En ligne à : http://scrippsco2.ucsd.edu/data/data.html (consulté le 14 novembre 2007).

FIGURE 4

ÉMISSIONS ANNUELLES DE CO_2 CAUSÉES PAR LES COMBUSTIBLES FOSSILES, LA FABRICATION DU CIMENT ET LE TORCHAGE (1 Pg = 1 000 Mt)

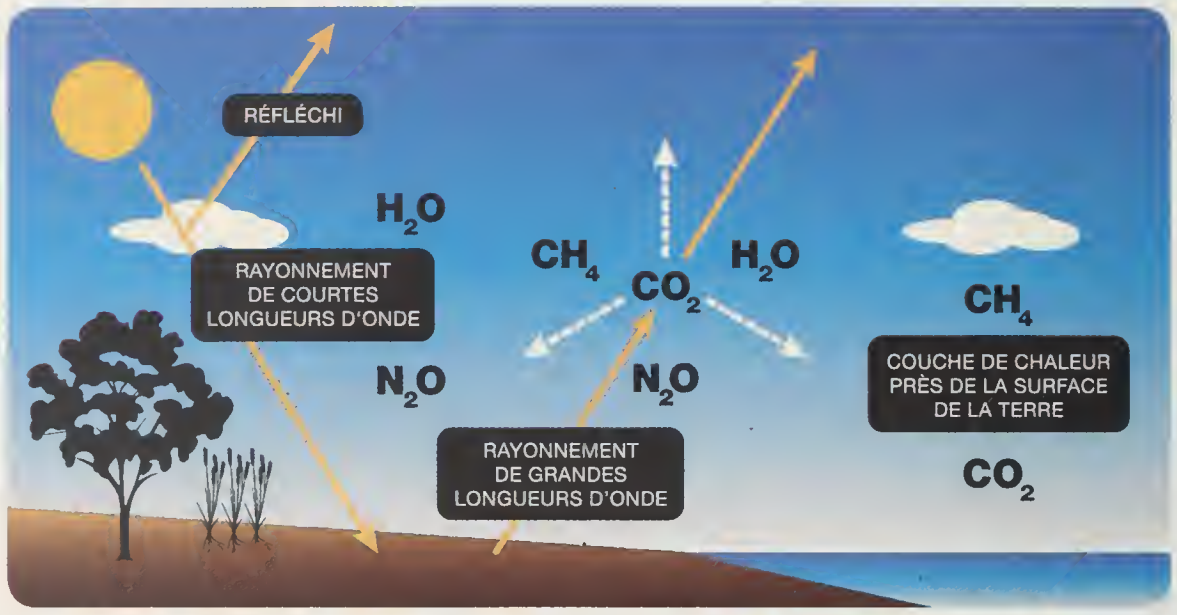


Source : Marland, G., T.A. Boden et R.J. Andres, « Global, Regional, and National CO_2 Emissions », dans *Trends: A Compendium of Data on Global Change*, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tennessee, États-Unis, 2007.

Le dioxyde de carbone n'est pas le seul gaz à effet de serre; le méthane (CH_4) et l'oxyde nitreux (N_2O), notamment, emprisonnent aussi la chaleur. Leur concentration s'est élevée, ce qui amplifie l'effet de l'augmentation du CO_2.

FIGURE 5

L'EFFET DE SERRE



La Terre reçoit continuellement des rayons provenant du Soleil, dont une partie (environ 30 %) est réfléchie directement dans l'espace par les nuages, par d'autres matières présentes dans l'atmosphère, ainsi que par la surface de la Terre, particulièrement les régions couvertes de neige et d'autres matières de couleur claire. Le reste, qui constitue environ l'équivalent en énergie de plusieurs ampoules électriques par mètre carré, est absorbé par la Terre. La Terre ayant été réchauffée émet un rayonnement vers l'espace, mais celui-ci ne traverse pas facilement l'atmosphère. Certains des gaz contenus dans l'atmosphère – les gaz à effet de serre (GES) – absorbent et émettent à leur tour le rayonnement de la Terre, créant ainsi une couche de chaleur près de la surface de la planète. Par conséquent, l'effet de serre survient en raison de la différence entre le rayonnement du Soleil, appelé ***rayonnement de courtes longueurs d'onde****, qui traverse les GES, et le rayonnement de la Terre, appelé* ***rayonnement de grandes longueurs d'onde****, qui ne les traverse pas. Les deux formes de rayonnement sont différentes en raison de la température de leur source : comme le Soleil est beaucoup plus chaud que la Terre, son rayonnement a une longueur d'onde plus courte qui nous est visible; le rayonnement de la Terre correspond davantage à la chaleur que l'on sent émaner d'un radiateur à eau chaude.*

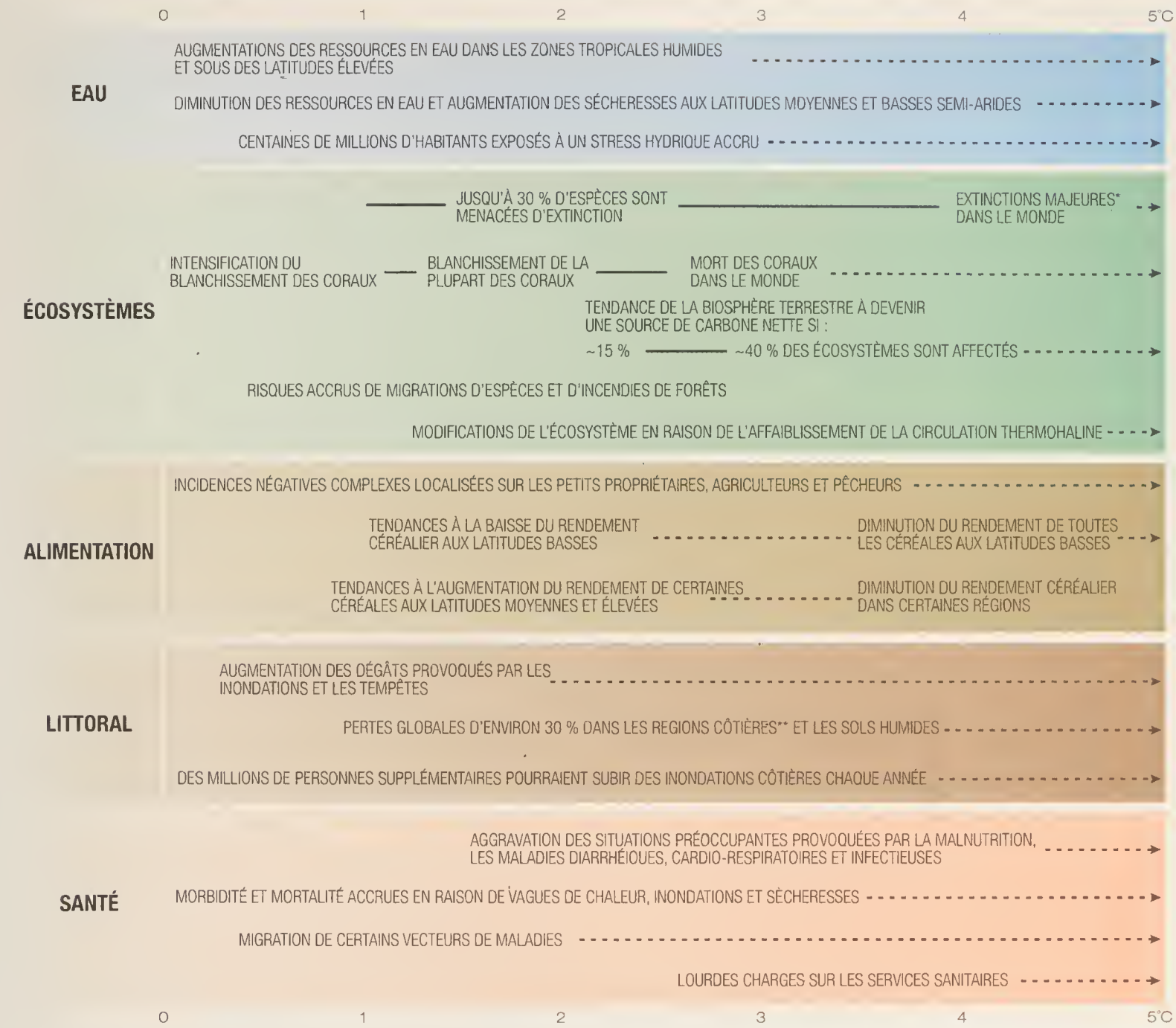
L'effet de serre est essentiel à la vie sur Terre; sans son effet réchauffant, la Terre serait une planète froide et inhospitalière. La hausse des concentrations de GES, par contre, pourrait mener à une ***intensification*** *de l'effet de serre, ce qui entraînerait des changements de climat désagréables.*

FIGURE 6

Répercussions mondiales éventuelles

Voici des exemples de ce qui pourrait se produire en conséquence des hausses variables de la température en surface au cours du XXIe siècle.

Source : GIEC, Groupe de travail II. *Résumé à l'intention des décideurs*, 2007. En ligne à : www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg2/ar4-wg2-spm-fr.pdf (consulté le 14 novembre 2007).



Changements des températures mondiales moyennes annuelles pour la période 1980-1999 (°C)

* « Majeur » signifie ici supérieur à 40 %

** Sur la base d'une élévation du niveau de la mer à un rythme moyen de 4,2 mm/an entre 2000 et 2080.

TABLEAU 1

LES PRINCIPAUX GES ÉMIS OU ABSORBÉS PAR LES FERMES

Le potentiel d'effet de serre d'un gaz indique avec quelle efficacité ce gaz réchauffe l'atmosphère. Par exemple, un kilogramme de CH_4 réchauffera l'atmosphère 25 fois plus qu'un kilogramme de CO_2. Les estimations du potentiel de réchauffement climatique évoluent constamment à mesure que les connaissances scientifiques progressent. Celles données ici ont été présentées par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat en 2007.

	SYMBOLE CHIMIQUE	CONCENTRATION PRÉINDUSTRIELLE	CONCENTRATION EN 2005	POTENTIEL DE RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE	IMPORTANTES SOURCES ANTHROPIQUES
Dioxyde de carbone	CO_2	280 ppm	379 ppm	1	Brûlage de combustibles fossiles et déforestation
Méthane	CH_4	715 ppb	1774 ppb	25	Agriculture et utilisation de combustibles fossiles
Oxyde nitreux	N_2O	270 ppb	319 ppb	298	Agriculture

En quoi l'agriculture est-elle en cause?

L'agriculture est liée de près aux GES, dont trois en particulier : le CO_2, le N_2O et le CH_4. Dans le passé, de grandes quantités de CO_2 étaient libérées lorsque l'on incendiait des forêts et labourait des prairies pour créer des espaces destinés à l'agriculture. Encore aujourd'hui, l'agriculture constitue une source importante de GES, puisqu'elle produit environ 10 à 12 % des émissions mondiales. (Ceci ne comprend pas les émissions découlant des changements d'affectation des terres qui entraînent l'émission de quantités additionnelles.)

Contrairement aux autres secteurs, les émissions des GES du secteur agricole sont principalement composées de CH_4 et de N_2O, deux gaz dont l'effet de serre est très puissant. Comme le montre le tableau 1, l'agriculture constitue la principale source *anthropique*, c'est-à-dire due à l'activité humaine, de ces GES. Le méthane est émis en grande partie par le bétail ruminant, comme les bœufs et les moutons, tandis que le N_2O provient surtout de l'activité des microorganismes du sol, qui transforment l'azote, particulièrement dans les sols où les engrais ou le fumier ajoutent beaucoup d'azote.

Cela dit, l'agriculture joue aussi un rôle important pour *diminuer* la concentration des GES dans l'atmosphère. Lorsque les terres agricoles ont été cultivées pour la première fois, elles ont perdu une grande partie du carbone qui se trouvait dans le sol; les Prairies canadiennes, par exemple, ont perdu dans l'atmosphère 30 % ou plus du carbone accumulé dans les matières organiques (humus) dans les décennies qui ont suivi le premier labourage. Comme l'explique notre chapitre sur le carbone, nous savons maintenant qu'il est possible, par des pratiques agricoles améliorées,

de rétablir les stocks de carbone en extrayant le CO_2 de l'atmosphère. Chaque tonne de carbone nouvellement accumulée dans le sol constitue une tonne de moins dans l'air. Cette *séquestration du carbone* est vue par de nombreux pays – y compris le Canada – comme une façon de réduire les émissions nettes globales de GES.

Étant donné l'importance de l'agriculture à la fois comme *source* et comme éventuel *puits* – ou absorbeur – de GES, beaucoup de recherches ont été entreprises récemment pour comprendre les deux phénomènes. Elles visent dans l'immédiat à aider le Canada à atteindre ses objectifs de réduction des émissions de GES. Pour l'heure, l'amélioration des pratiques agricoles ne peut jouer qu'un rôle mineur. Mais elle apporte l'exemple d'une intervention qui, s'ajoutant à des petits gestes dans d'autres secteurs de la société, peut mener à de grandes réductions.

Les GES en tant qu'indicateurs écologiques

Toutes ces recherches offrent un autre avantage souvent ignoré. Les GES qui sont émis en excès nous disent quelque chose sur le rendement d'un système écologique (soit d'une ferme, pour ce qui nous occupe). Si le sol émet de grandes quantités de N_2O, on peut conclure que l'azote, une denrée chère et un polluant éventuel, n'est pas utilisé de façon judicieuse. Si le bétail émet trop de CH_4, nous savons que l'énergie nutritive n'est pas utilisée de façon optimale. Si les terres perdent du carbone, nous savons que l'énergie solaire stockée dans la matière organique du sol n'est pas investie de façon prudente.

Plus simplement, on peut dire que les GES signalent avec quelle efficacité nos écosystèmes fonctionnent et nous orientent vers des méthodes plus efficaces de culture et d'élevage. Cet avantage, qui n'est pas toujours pris en compte, justifie déjà les études consacrées aux GES, en plus de contribuer à l'atteinte des objectifs de réduction.

Notre objectif, dans la présente publication, est d'examiner les récentes conclusions concernant les émissions de GES provenant des exploitations agricoles du Canada. Les informations que nous présentons proviennent en bonne partie des recherches effectuées au cours des cinq dernières années dans le cadre du Programme de modèles d'exploitations agricoles d'Agriculture et Agroalimentaire Canada. Nous les étayons de résultats obtenus par d'autres scientifiques au Canada et ailleurs. Nous cherchons à montrer à quel point l'amélioration des pratiques agricoles peut réduire les émissions de GES, et aussi comment la science nouvelle de la réduction des GES peut nous guider vers de meilleures pratiques agricoles.

Les conclusions scientifiques que nous exposons sont d'intérêt tant pour les membres des collectivités agricoles que pour tous les citoyens. Comme l'indiquent les GES qui circulent librement, nous sommes tous liés; les gaz ne connaissent pas de frontière entre les fermes et les forêts, entre les terres agricoles et les centres-villes, ou encore, entre les générations d'aujourd'hui et celles de demain.

Les gaz à dioxyde de carbone

LA GESTION DU CARBONE DANS LES SYSTÈMES AGRICOLES

Dans la conclusion de son ouvrage précurseur, *L'Origine des espèces*, Charles Darwin réfléchissait sur les complexités de la vie sur Terre et sur la variété de formes qui sont apparues grâce à la sélection naturelle. « N'y a-t-il pas une véritable grandeur dans cette manière d'envisager la vie », a-t-il écrit. Si Darwin avait été biochimiste, il aurait sans aucun doute été émerveillé par la simplicité et la beauté des liens chimiques qui unissent tous les êtres vivants et qui les arriment fermement à leurs milieux – des liens tissés à partir des atomes de carbone.

Le carbone est un élément chimique présent dans tous les organismes vivants. Lié à lui même, il forme les chaînes qui constituent le pivot des composés biochimiques importants, du simple glucide à la molécule héréditaire d'ADN. Le présent chapitre décrit comment le carbone circule au sein des systèmes agricoles et accorde une attention particulière à sa présence dans le sol. Pour commencer, il est utile de situer l'agriculture dans le contexte du cycle planétaire du carbone et de comprendre le rôle du carbone dans les changements climatiques et dans le transfert d'énergie.

Le cycle du carbone à l'échelle planétaire

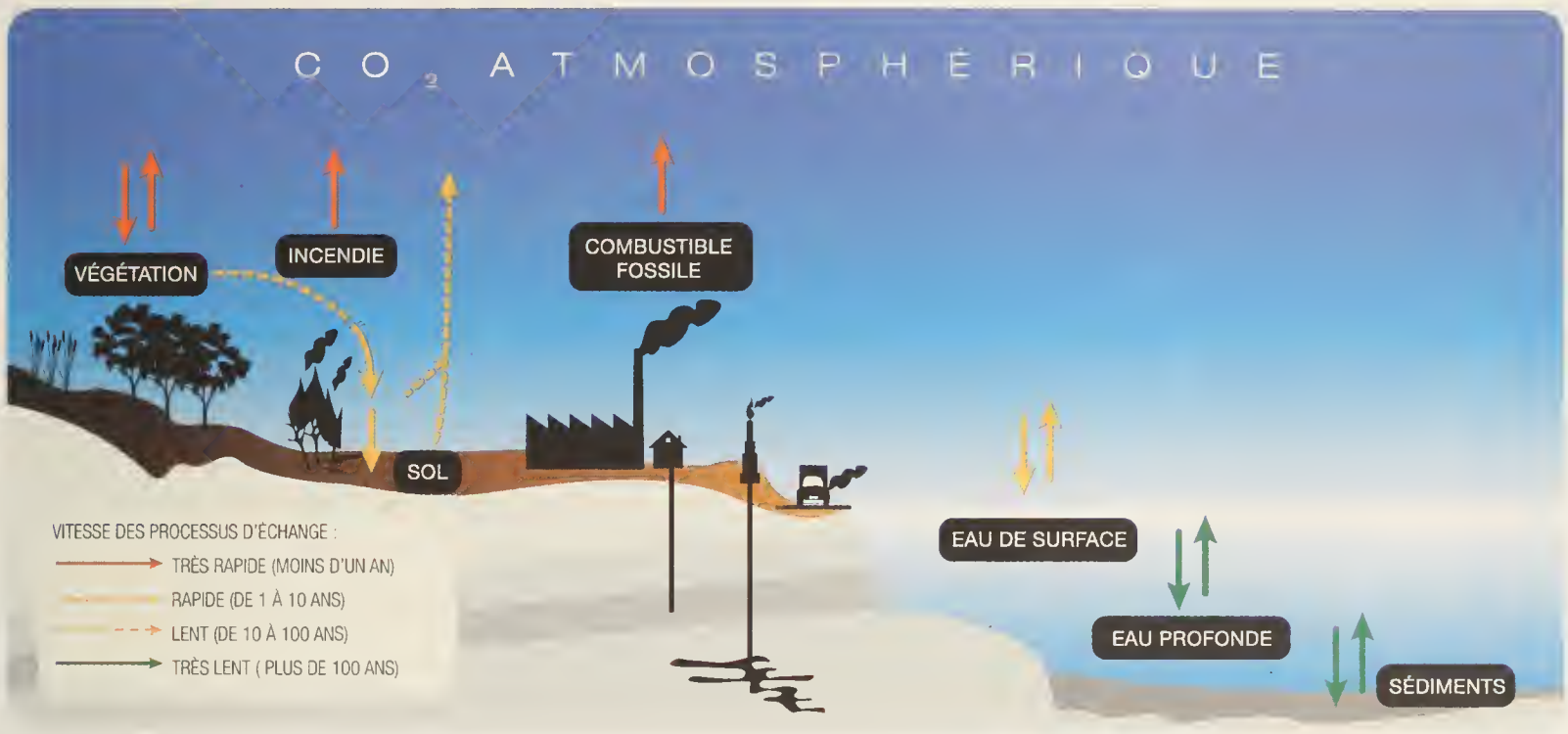
Tout le carbone qui participe au cycle planétaire du carbone existait lors de la formation de notre système solaire. Cet élément, quatrième en abondance sur Terre, circule dans un énorme cycle biogéochimique; il passe des organismes vivants à l'atmosphère, revient à la surface de la planète, pénètre dans les terres et se mélange aux océans et aux eaux douces. Les atomes de carbone demeurent dans certaines formes chimiques durant des milliers d'années et dans d'autres, à peine quelques heures.

Dans l'environnement non vivant, le carbone existe sous plusieurs formes :

- le CO_2 dans l'atmosphère et dans l'eau;
- les carbonates, tels que le carbonate de calcium, qui se trouvent dans le calcaire et le corail;
- les gisements de combustibles fossiles, tels que le charbon, le pétrole et le gaz naturel, formés à partir des tissus des organismes ayant vécu il y a très longtemps;
- les matières organiques présentes dans le sol.

FIGURE 7

Le cycle planétaire du carbone



Source : Troisième évaluation du Groupe d'experts intergouvermental sur l'évolution du climat, 2001

FIGURE 8

Photosynthèse et respiration

PHOTOSYNTHÈSE :

$$CO_2 + \text{LUMIÈRE} + H_2O \dashrightarrow CH_2O + O_2$$

La photosynthèse transforme l'énergie solaire en énergie chimique. En présence de la lumière du soleil, le dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère se combine à l'eau absorbée par la racine des plantes. Cette réaction forme dans la plante des composés tels que les glucides et entraîne la libération d'oxygène dans l'atmosphère.

RESPIRATION :

$$CH_2O + O_2 \dashrightarrow CO_2 + H_2O + \text{ÉNERGIE}$$

La respiration permet aux organismes d'utiliser l'énergie produite au cours de la photosynthèse. Le carbone présent dans les composés de la plante se combine à l'oxygène. Cette réaction entraîne la libération de carbone sous forme de CO_2 et la libération d'eau et d'une certaine énergie sous forme de chaleur.

Le carbone pénètre dans les organismes vivants grâce à la photosynthèse. Les végétaux, principaux producteurs primaires, absorbent le CO_2 dans leurs feuilles à partir de l'atmosphère et utilisent l'énergie du soleil pour fixer le carbone et le transformer en glucides (sucres). Ces glucides fournissent de l'énergie aux plantes et deviennent un élément constitutif fondamental du tissu végétal. Le carbone circule au sein de la chaîne alimentaire lorsque les herbivores se nourrissent des végétaux et que d'autres organismes vivants mangent ces herbivores. De cette façon, le carbone se retrouve dans tous les tissus vivants.

Le carbone revient dans l'atmosphère ou dans l'eau par la voie de la respiration cellulaire des organismes vivants. Au cours de ce processus, les glucides sont *oxydés* en présence de l'oxygène. Ceci produit du CO_2, gaz résiduaire que l'organisme rejette dans l'atmosphère environnante. Un exemple important de cette respiration est la *décomposition* ou la *dégradation*, par laquelle les tissus des organismes autrefois vivants sont consommés par des microorganismes, libérant ainsi le carbone qui était contenu dans ces tissus. Une réaction chimique de combustion similaire se produit pendant les incendies de forêt ou quand les humains font brûler des combustibles fossiles afin de satisfaire à leurs besoins en énergie. Toutes ces actions entraînent le rejet de CO_2 dans l'atmosphère. Une partie du carbone est également libérée sous forme de CH_4 lorsque la dégradation se produit en l'absence d'une quantité d'oxygène suffisante pour produire du CO_2.

OXYDATION DU MÉTHANE DANS LES TERRES AGRICOLES

Les terres agricoles émettent de grandes quantités de N_2O et peuvent être à la fois une source ou un puits de CO_2 atmosphérique. Elles peuvent aussi générer ou consommer du CH_4, mais en quantité beaucoup plus faible.

Le méthane est le principal constituant du gaz naturel, et son oxydation libère une quantité considérable d'énergie. Les bactéries méthanotrophes, qui sont des bactéries du sol, peuvent métaboliser le CH_4 pour en tirer de l'énergie et du carbone lorsqu'il y a beaucoup d'oxygène. Dans le cas des terres agricoles qui sont drainées, cette réaction se produit sur la majeure partie du sol pendant la période de végétation, mais à des taux très faibles. En effet, il faut environ 100 hectares de terre pour oxyder la quantité de CH_4 produite par une vache laitière en lactation.

D'autres bactéries du sol, les bactéries méthanogènes, produisent du CH_4 pendant la décomposition anaérobie de substrats organiques. Leur activité dans les parties de la ferme qui sont saturées en eau, comme les fossés ou les structures de stockage du fumier, peut entraîner de petites émissions nettes de CH_4.

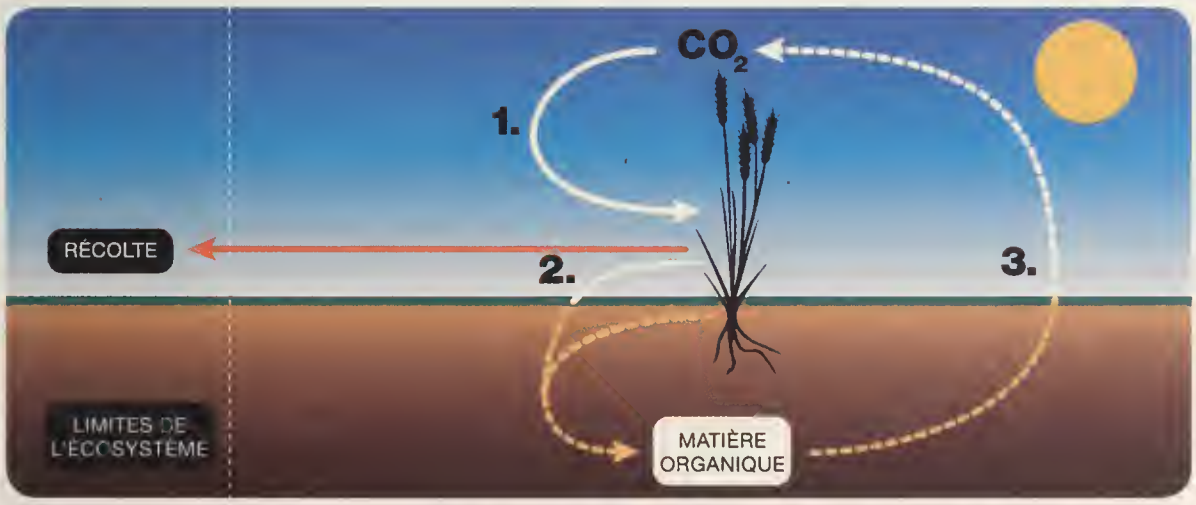
Le cycle du carbone à la ferme

Comme dans les écosystèmes naturels, les végétaux des agroécosystèmes absorbent, ou *fixent*, le carbone au moyen de la photosynthèse. Une partie du carbone est renvoyée dans l'atmosphère sous forme de CO_2 par la respiration cellulaire. Une autre partie est retirée du système par la récolte. Le reste demeure dans le sol, dans les racines des plantes, ou est incorporé au sol à partir des débris végétaux laissés en surface.

À mesure que ces débris sont décomposés par les microorganismes, une partie du carbone est renvoyée dans l'atmosphère sous forme de CO_2, une autre partie est absorbée par les microorganismes et le reste devient des matières organiques du sol. Dans les systèmes agricoles qui comprennent des productions animales, le carbone peut être retiré du système sous forme de fourrage et d'aliments destinés aux animaux, et ensuite sous forme de produits animaux, tels que la viande, avant de retourner dans le sol sous forme de fumier. De plus, les animaux en respirant rejettent du CO_2 directement dans l'atmosphère.

FIGURE 9

LE CYCLE DU CARBONE DANS UN ÉCOSYSTÈME AGRICOLE



Le carbone du sol est un élément dynamique. Les changements liés à la quantité de carbone stocké dans les matières organiques du sol dépendent des taux relatifs d'apport en carbone provenant de la litière végétale et du carbone émis sous forme de CO_2 par la décomposition. Si les apports de carbone sont plus importants que les pertes, la quantité stockée augmente; s'ils sont moins importants que les pertes, la quantité stockée diminue. Afin d'augmenter les quantités de carbone stockées, il faut mettre en œuvre des pratiques qui visent à : 1) augmenter le rendement végétal (photosynthèse); 2) augmenter la proportion de carbone fixé qui est ajouté au sol; 3) ralentir la vitesse de décomposition des matières organiques.

L'importance du carbone dans les changements climatiques

Depuis le début de l'industrialisation, il y a environ 150 ans, le carbone présent dans l'atmosphère a augmenté dans une proportion de plus de 30 %, passant de 280 à 380 ppm. Entre 1970 et 2004, les émissions mondiales de CO_2 ont augmenté de 70 %, devenant ainsi le plus important gaz à effet de serre *anthropique*, c'est-à-dire imputable à l'activité humaine. La hausse a été provoquée surtout par la consommation accrue des combustibles fossiles pour combler les besoins en énergie et, dans une moindre mesure, par les changements d'affectation des terres, par exemple, le déboisement pour faire place à l'agriculture et au peuplement.

La hausse des concentrations atmosphériques de CO_2 a semé la crainte d'une perturbation du climat et a poussé les scientifiques et les décideurs à trouver des façons de freiner cette hausse. Pour cela, il faut mieux comprendre comment le carbone circule dans les écosystèmes terrestres, y compris les agroécosystèmes, et comment ce flux est lié à l'énergie.

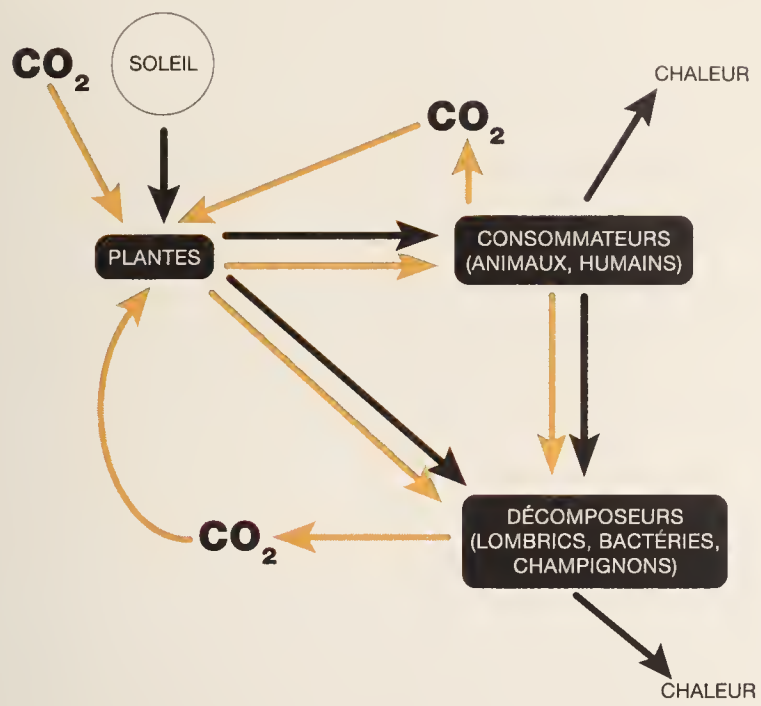
Le carbone comme devise énergétique

Presque toute l'énergie utilisée par les systèmes vivants tire son origine du soleil. Par la photosynthèse, l'énergie lumineuse provenant du soleil est emprisonnée dans les liaisons qui unissent les molécules de glucide. Ainsi, l'énergie de tous les composés organiques réside dans leurs liaisons chimiques constituantes et circule au sein des écosystèmes, emmagasinée dans ces liaisons. Lorsqu'un combustible est brûlé, l'énergie est libérée sous forme de chaleur, dont les humains se servent pour chauffer leurs maisons, faire fonctionner les moteurs automobiles et faire tourner des turbines de façon à produire de l'électricité. Durant la respiration cellulaire, la combustion des glucides présents à l'intérieur des cellules libère de l'énergie. Cette énergie est soit captée dans l'adénosine triphosphate (ATP), soit perdue sous forme de chaleur. C'est l'ATP qui apporte l'énergie à la plupart des réactions qui en nécessitent à l'échelle cellulaire et qui permet de faire bouger les muscles du corps et de synthétiser des composés chimiques complexes.

Une partie de l'énergie contenue dans les composés organiques demeure stockée dans les écosystèmes pendant des années, voire des millénaires. Elle peut être emmagasinée dans des éléments végétaux, tels que le bois, ou dans des matières organiques du sol, ce qu'on appelle l'*humus*, qui proviennent des tissus en décomposition d'organismes morts. Plus un écosystème contient de carbone, plus il contient d'énergie. Une très petite proportion de matière organique est emprisonnée durant de longues périodes dans des gisements de carbone fossile, comme le charbon, le pétrole et le gaz naturel. Les humains extraient ces combustibles fossiles et les font brûler pour satisfaire leurs besoins en énergie – de fait, ils se trouvent à libérer l'énergie solaire qui a été emprisonnée sous terre pendant des millions d'années.

FIGURE 10

Circulation du carbone et de l'énergie au sein d'un écosystème



Énergie

Dans la photosynthèse, les plantes transforment l'énergie rayonnante du soleil en énergie chimique, laquelle est stockée dans la plante. Cette énergie circule d'organisme en organisme le long de la chaîne alimentaire. Les plantes sont consommées par les animaux et les humains, qui utilisent l'énergie – pour bouger, manger et réfléchir – ou la perdent sous forme de chaleur. Les décomposeurs, tels que les lombrics, les bactéries et les champignons, consomment les matières organiques mortes des plantes et les déchets des consommateurs et utilisent l'énergie ou la perdent sous forme de chaleur. Toute l'énergie présente dans un écosystème provient du soleil et finit par être perdue sous forme de chaleur. L'énergie n'est pas recyclée au sein d'un écosystème.

Carbone

Dans la photosynthèse, les plantes absorbent le carbone sous forme de CO_2 qui provient de l'atmosphère. Les plantes utilisent ce carbone pour produire des sucres et de l'amidon qui entrent par la suite dans la composition des feuilles et des fruits de ces plantes. Lorsque les plantes sont consommées par d'autres organismes, le carbone circule. Chaque fois que le carbone circule d'un organisme à un autre, il se perd en partie dans l'atmosphère sous forme de CO_2, où il peut être utilisé à nouveau par les plantes en croissance. Tout le carbone présent dans un écosystème provient de l'atmosphère et finira par y retourner. Le carbone est recyclé au sein de l'écosystème.

COMPRENDRE LES UNITÉS ÉNERGÉTIQUES

La quantité d'énergie qui est contenue dans la nourriture que nous mangeons est couramment exprimée en calories. La calorie, donc, n'est qu'une unité servant à mesurer l'énergie. Précisément, il s'agit de la quantité de chaleur requise pour augmenter d'un degré Celsius la température d'un millilitre d'eau. La calorie comme unité d'énergie a été remplacée par le joule dans la collectivité scientifique. Une calorie correspond environ à quatre joules, et un kilojoule (kJ) représente 1 000 joules.

À l'échelle planétaire, les végétaux retirent chaque année de l'atmosphère près de 120 milliards de tonnes de carbone. Si on fait la moyenne sur l'ensemble de la surface émergée de la Terre, cela donne environ huit tonnes de carbone par hectare (plus ou moins la superficie d'un terrain de football). Environ la moitié de cette quantité de carbone est utilisée par les végétaux pour satisfaire leurs propres besoins en énergie, ce qui laisse environ 60 milliards de tonnes (soit quatre tonnes par hectare) qui seront emmagasinées dans leurs tissus. On appelle cette valeur de stockage la *production primaire nette* (PPN). La quantité de carbone qui est stockée dans un site donné varie selon de nombreux facteurs, dont le climat et l'espèce végétale. Par exemple, la PPN dans une forêt tropicale est beaucoup plus élevée que dans le désert. Toute cette matière carbonée est soit consommée par des animaux, soit consumée par le feu, soit transformée à nouveau en litière végétale sur le sol où elle finit par se décomposer.

Le contenu énergétique des éléments végétaux varie de 15 à 20 kilojoules par gramme. Plus leur teneur en carbone est élevée, plus ces végétaux contiennent de l'énergie. Les composés d'origine végétale importants qui ont une très haute teneur en carbone, et donc une haute teneur en énergie, sont les lipides, la lignine et les protéines.

Le sol est une pile qui se décharge

Le sol peut contenir beaucoup de carbone. Par exemple, dans un champ de maïs, la quantité de carbone qui se trouve dans les 60 premiers centimètres d'épaisseur du sol peut être de 10 fois supérieure à la quantité contenue dans la végétation en surface. Le carbone du sol représente une grande réserve d'énergie. De fait, le sol est comme une pile qui peut être épuisée de certaines façons et rechargée d'autres façons.

Dans un écosystème vierge, l'énergie s'est accumulée dans le sol pendant des millénaires; le sol a fait le plein de carbone, c'est-à-dire qu'il a atteint un niveau d'équilibre. Toute perturbation de cet équilibre entraîne une perte de carbone, et donc une perte d'énergie. La culture et l'érosion par-dessus tout épuisent les stocks de carbone du sol et déchargent l'énergie accumulée.

Les agriculteurs ont commencé à labourer les Prairies canadiennes il y a environ 100 ans. En quelques décennies, ces riches sols de prairie ont perdu 30 % ou plus de la quantité totale de carbone qui y était stockée. Cette perte s'est produite de plusieurs façons :

- L'apport en carbone dans le sol des plantes cultivées était souvent inférieur à celui des plantes indigènes qu'elles ont remplacées.
- À mesure que les cultures étaient récoltées, du carbone était retiré du système. Une moins grande quantité de carbone d'origine végétale était retournée à la terre chaque année.

- Le travail du sol a perturbé les matières organiques stables et protégées du sol et, conjugué à la culture à cycle court, a souvent créé des conditions de température et d'humidité dans le sol qui accéléraient la décomposition des matières organiques riches en carbone.
- Les sols travaillés sont plus susceptibles de perdre la terre arable riche en carbone en raison de l'érosion attribuable au labour, au vent et à l'eau.

La mise en culture favorise l'érosion, c'est-à-dire le déplacement des particules du sol par le vent ou par l'eau. L'érosion redistribue le sol, l'entraînant de certains endroits pour le déposer ailleurs. Certains champs perdent 75 % de leurs matières organiques après avoir été cultivés.

TABLEAU 2

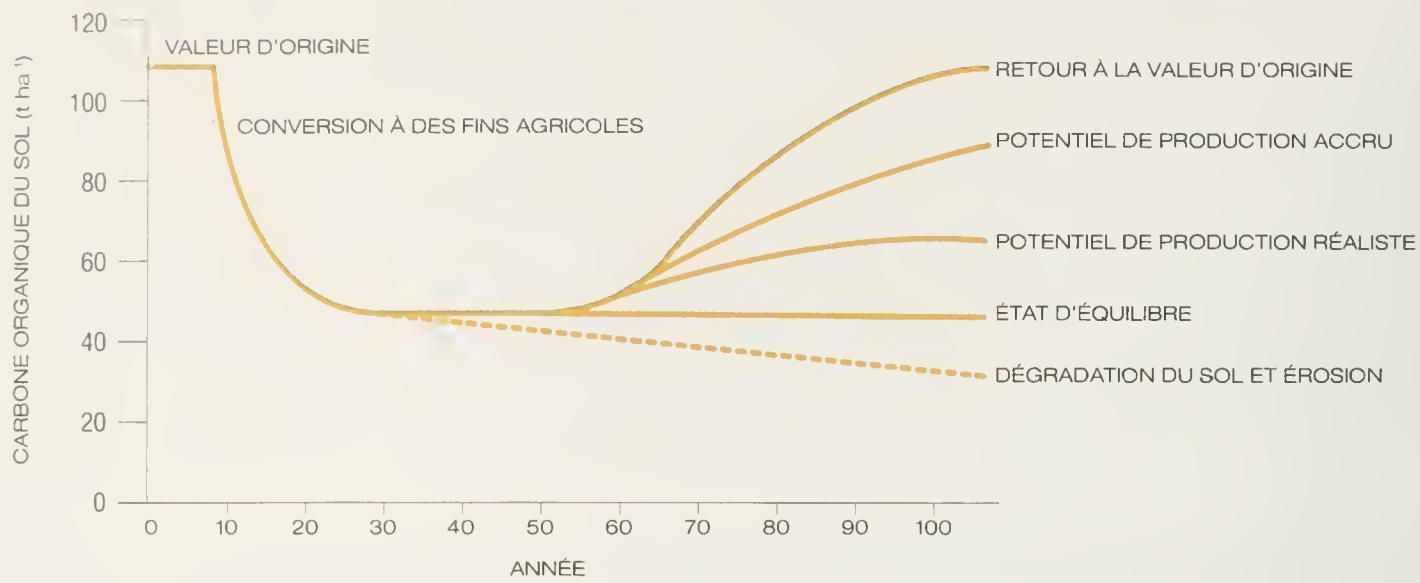
LE CONTENU ÉNERGÉTIQUE DE CERTAINS COMPOSÉS ORGANIQUES

MATIÈRE	CONTENU ÉNERGÉTIQUE ($kJ\ g^{-1}$)
Cellulose	18
Amidon	17
Lipide	39
Plantes terrestres (entières)	19
Plantes terrestres (semences)	22
Insectes	24
Bois (chêne)	21
Tourbe	20
Humus forestier	21
Matière organique du sol	20
Charbon de bois	34
Charbon	29-34
Pétrole brut	42
Diesel	48
Gaz naturel	38-50
Biodiesel	38
Méthane	55
Éthane	52
Uranium-235	77 000 000
Fusion nucléaire (^{2}He-^{3}He)	300 000 000

Source : *Energy Content of Biofuel*. En ligne à http://en.wikipedia.org/wiki/Energy_content_of_biofuel (consulté le 12 novembre 2007).

FIGURE 11

LES EFFETS DE LA CULTURE SUR LE CARBONE DU SOL



La teneur en carbone du sol se modifie quand il y a un changement dans les pratiques d'affectation ou de gestion des terres. Lorsque les terres vierges du Canada ont été labourées et cultivées pour la première fois, environ le tiers du contenu en carbone a été perdu dans les 20 à 30 années qui ont suivi. Il serait possible, dans les systèmes agricoles canadiens, de regagner une partie du carbone qui a été perdu grâce à l'utilisation de meilleures pratiques, comme la culture sans labour, et à la plantation de cultures, telles que les légumineuses, qui font augmenter les quantités de matières organiques du sol. Un gain en carbone encore plus important peut être réalisé au moyen de nouvelles pratiques agricoles, comme l'intégration de plantes vivaces dans les systèmes de culture.

Une érosion importante peut décaper le sol de sa couche superficielle. S'il est travaillé ensuite, le labour mélange le sol de surface avec les couches inférieures, moins riches en matières organiques. Ce mélange a pour effet de diluer les matières organiques en surface. Pendant ce temps, les matières organiques emportées par l'érosion se retrouvent ailleurs, où elles forment un dépôt épais riche en matières organiques. L'érosion modifie ainsi la répartition latérale et verticale des matières organiques – et donc du carbone et de l'énergie – dans le paysage. Une teneur réduite en matières organiques limite la croissance des végétaux, et par conséquent la production primaire nette, ce qui réduit encore la quantité de tissus végétaux morts qui retournent à la terre. Les sols qui possèdent une faible quantité de matières organiques sont plus susceptibles d'être érodés. C'est un cercle vicieux, et le sol continue de se dégrader.

Le sol est une pile qui se recharge

La quantité de matières organiques du sol augmente lorsque l'apport en carbone (accumulation d'énergie) est plus grand que le retrait ou la perte (perte d'énergie). Il est possible de recharger le sol :

- soit par un apport plus élevé de carbone dans le sol grâce à un accroissement de la production des cultures ou en retournant au sol une quantité plus élevée de résidus végétaux après la récolte;
- soit par la diminution de la vitesse de décomposition des débris végétaux et des matières organiques du sol.

La quantité de carbone qui peut être stockée dans le sol – et la vitesse de stockage – dépend de nombreux facteurs locaux, dont le climat, la topographie, les caractéristiques du sol, telles que sa teneur en argile, et les antécédents culturaux. Par exemple, les sols qui ont déjà perdu beaucoup de carbone présentent parfois de meilleures possibilités de gain.

Les diverses pratiques agricoles qui font augmenter la quantité de carbone dans le sol peuvent être groupées selon les stratégies suivantes :

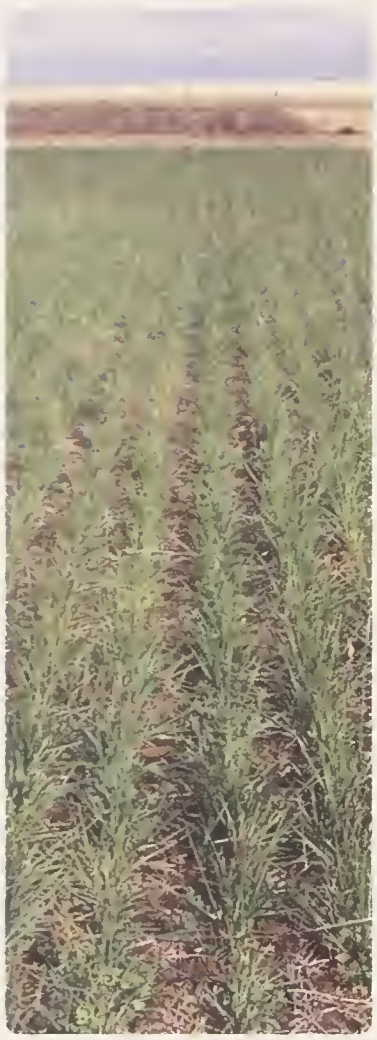
- Diminution du travail du sol,
- Intensification des systèmes de culture,
- Amélioration de la nutrition des cultures,
- Amendements organiques du sol,
- Augmentation des cultures vivaces,
- Amélioration de la gestion des prairies.

Diminution du travail du sol

Depuis que l'agriculture existe, le travail du sol sert à contrôler les mauvaises herbes, à préparer les terres pour le semis et à incorporer au sol les résidus de culture. Au cours des dernières décennies, la mise au point de nouveaux herbicides et le perfectionnement des semoirs ont rendu possible une diminution importante du travail du sol dans bon nombre de systèmes agricoles. La *culture sans labour*, soit le système de travail réduit à l'extrême, élimine complètement le travail du sol, à l'exception des semailles.

Le travail du sol est un facteur déterminant de l'état général du sol. Il modifie les caractéristiques de stockage d'eau, ce qui a une incidence sur la production des cultures et la vitesse à laquelle les matières organiques se décomposent; il brise les agrégats, ce qui expose de nouvelles matières organiques à la décomposition; il incorpore les débris végétaux dans le sol, ce qui en modifie le profil; il accroît le contact entre le sol et les débris végétaux.

Il est évident que l'élimination du travail du sol modifiera la répartition du carbone dans le profil de sol. Dans les systèmes de culture sans labour, le carbone tend à s'accumuler à la surface et ne se déplace que graduellement dans les couches plus profondes par des processus naturels, tels que l'activité des lombrics (vers de terre). Les systèmes de culture sans labour ont également une incidence sur la quantité de carbone stockée, puisque les matières organiques se décomposent souvent plus lentement dans les sols qui n'ont pas été travaillés; le contact entre la terre et les débris végétaux est réduit, ce qui isole la litière végétale près de la surface et ne dérange pas les agrégats qui protègent les matières organiques.



Puisque le brassage du sol favorise généralement la perte de carbone en raison de l'augmentation de l'érosion et de la décomposition, l'élimination du travail du sol entraîne souvent un gain en carbone, mais pas toujours. Une fois le travail du sol éliminé, la quantité et la vitesse d'augmentation de la teneur en carbone d'un sol varient selon les conditions climatiques, le type de sol et la teneur initiale en carbone. L'élimination du travail du sol a généralement un plus grand effet sur les sols dont les réserves de carbone sont épuisées. Le carbone du sol tend à s'accumuler plus rapidement dans des conditions d'humidité peu élevée. C'est parce que, dans les zones moins humides, les systèmes de culture sans labour permettent davantage de conserver l'humidité et d'accroître le rendement des cultures. Un rendement de culture élevé laisse davantage de litière végétale près de la surface du sol, ce qui ralentit la décomposition et augmente la quantité de carbone dans le sol de surface. L'élimination du travail du sol *peut* donc faire augmenter les réserves de carbone dans le sol, mais ne le *garantit* pas; la quantité de carbone qui s'accumule varie selon l'endroit et les facteurs de gestion.

Culture intensive

La jachère, c'est-à-dire la pratique qui consiste à laisser la terre reposer pendant une période de végétation, a déjà été grandement utilisée dans l'Ouest canadien afin de préserver l'humidité, de contrôler les mauvaises herbes et d'accroître la quantité d'éléments nutritifs. Par contre, la jachère entraîne une perte de carbone dans le sol; en effet, comme aucun résidu de culture n'est produit dans la période de jachère, les apports de carbone diminuent. La jachère crée également des conditions, telles qu'une teneur élevée en humidité et des températures élevées, qui favorisent la décomposition rapide des matières organiques se trouvant déjà dans le sol. Ainsi, l'élimination de la jachère peut faire augmenter de façon considérable les réserves de carbone dans le sol.

L'amélioration des pratiques agricoles, notamment la mise au point de systèmes de travail réduit du sol, a permis aux agriculteurs de nombreuses régions de l'Ouest canadien d'éliminer la jachère. Voilà qui a grandement contribué au stockage net de carbone dans les provinces de l'Ouest depuis 1990.

Amélioration de la nutrition des cultures

Toute pratique permettant l'accroissement du rendement des cultures augmente la quantité de carbone dans le sol, à condition que le surcroît de résidus soit retourné à la terre. Ainsi, l'utilisation d'engrais dans les sols déficients en éléments nutritifs en vue d'accroître le rendement permet souvent d'augmenter le stock de carbone du sol. Cet effet n'est pas toujours mesurable, puisque les apports de carbone peuvent être faibles relativement à la quantité de carbone déjà présente. De plus, de nombreuses terres agricoles au Canada sont déjà fertilisées de façon optimale, ou presque; les apports supplémentaires en carbone résultant d'une utilisation accrue d'engrais peuvent alors être négligeables.

Amendements organiques

Les agriculteurs savent depuis des millénaires que l'épandage du fumier (déjections animales) dans un champ peut améliorer la fertilité du sol. Le fumier est riche en matières organiques et en éléments nutritifs, et son épandage sur une terre entraîne généralement une augmentation du carbone organique et de l'énergie dans cette terre. La fumure d'une terre peut également faire augmenter indirectement la teneur en carbone du sol par l'augmentation du rendement de culture, qui se répercute sur l'apport de carbone, ou encore, par l'amélioration de la structure du sol et par une protection accrue du carbone organique du sol contre la décomposition. Ces effets peuvent être considérés comme de véritables gains en carbone dans le sol, puisqu'ils augmentent la productivité primaire nette ou diminuent la décomposition des matières carbonées.

À l'échelle mondiale, cependant, il est possible que le recyclage du carbone végétal par le fumier n'augmente pas réellement le stockage du carbone dans le sol. Il n'y a véritablement que deux façons de stocker une plus grande quantité de carbone : augmenter les apports en carbone photosynthétique ou ralentir la décomposition (ou la combinaison des deux). L'ajout de fumier n'accomplit ni l'un ni l'autre, sauf dans la mesure où il permet d'accroître le rendement grâce à un apport en éléments nutritifs ou à l'amélioration de la structure du sol. Le carbone qui se trouve dans le fumier n'est que du carbone végétal recyclé; il ne s'agit pas d'une quantité additionnelle extraite de l'atmosphère.

Augmentation des cultures vivaces

Tout comme dans le cas de l'épandage du fumier, les effets bénéfiques de la culture de plantes fourragères vivaces sur la qualité et la fertilité du sol sont connus depuis longtemps. L'utilisation accrue des cultures vivaces est maintenant considérée comme un des moyens les plus efficaces d'augmenter la teneur en carbone du sol. Les plantes fourragères vivaces, comme la luzerne, le trèfle, la phléole des prés et le pâturin, favorisent l'accumulation de carbone dans le sol, car elles :

- croissent sur une plus longue période que la plupart des plantes annuelles, et fixent ainsi une plus grande quantité de carbone atmosphérique;
- transfèrent à leurs racines une grande partie du carbone qu'elles ont fixé – jusqu'à trois fois leur production en surface – ce qui peut être plus important pour la formation de carbone dans le sol;
- maintiennent et renforcent la stabilité structurale du sol grâce à leurs racines étendues et parce qu'on ne travaille pas le sol pendant leur croissance, ce qui réduit la décomposition des matières carbonées.

Amélioration de la gestion des prairies

La plupart des terres agricoles du Canada ont déjà été couvertes de graminées, mais la transformation des prairies en terres cultivées a entraîné des pertes importantes de carbone dans les sols. Le rétablissement des graminées sur ces

terres peut permettre de reconstituer les réserves de carbone, peut-être même jusqu'aux valeurs d'origine. Lorsque cette pratique est utilisée dans le cas des terres retirées de la production, il peut y avoir des gains importants en carbone dans le sol. Par contre, puisque cette méthode nécessite la mise hors de production des terres, il est probablement préférable de ne l'appliquer qu'à des terres marginales.

Le Canada possède environ 28 millions d'hectares de pâturages. La gestion de ces terres – modification de la quantité et du type de végétation, de la quantité de résidus retournés à la terre et de la redistribution du carbone imputable à l'activité du bétail et à l'érosion – peut avoir une incidence sur les réserves en carbone dans le sol. Les taux potentiels de gain en carbone du sol résultant de l'amélioration des pratiques de pâturage sont probablement plus élevés dans le cas des terres qui ont été dégradées. Cependant, les taux d'accumulation n'ont pas été largement documentés.

La mesure du carbone du sol

Il est difficile d'estimer l'efficacité des pratiques de reconstitution des stocks de carbone dans le sol, car le gain se fait par hausses minimes, généralement une fraction de tonne de carbone par hectare et par an, alors que les quantités déjà présentes dans le sol peuvent atteindre 100 tonnes par hectare ou plus; dans un tel contexte, il faut parfois des années avant d'arriver à une mesure significative. Bon nombre des pratiques proposées de reconstitution des stocks de carbone dans le sol n'ont pas été étudiées assez longtemps et dans un nombre suffisant d'endroits pour établir avec certitude à quel point elles sont efficaces. Cependant, des estimations initiales ont été produites à partir des mesures faites dans des expériences de longue durée et des modèles de simulation informatique.

Le retrait du carbone de l'atmosphère pour le stocker dans le sol – appelé officiellement *séquestration du carbone* – est mis en valeur en vue d'atténuer les changements climatiques. Le fondement de cette stratégie est que le sol ne devient plus une source émettrice de carbone, mais plutôt un réservoir où l'on peut stocker le CO_2 extrait de l'atmosphère, ce qu'on appelle couramment un *puits de carbone*. Bien que le fait d'utiliser le sol en tant que puits de carbone puisse éventuellement faire diminuer le CO_2 atmosphérique et freiner les changements climatiques, cette stratégie ne peut pas être utilisée indéfiniment. Dans un champ où les pratiques agricoles sont améliorées depuis plusieurs dizaines d'années, le taux de gain en carbone chutera graduellement pour finir par atteindre une valeur presque nulle. Les matières organiques s'accumulant, leur décomposition augmente jusqu'à ce que les pertes de carbone finissent par être égales aux apports. À ce moment, le sol du champ atteint un nouvel équilibre. La séquestration du carbone dans le sol est donc une mesure temporaire d'extraction du carbone de l'atmosphère. Par ailleurs, le carbone stocké dans la matière organique du sol risque d'être libéré si le climat se réchauffe ou si les pratiques de gestion visant à le garder piégé sont interrompues. Ainsi, les gains réalisés par l'élimination du travail du sol peuvent être rapidement perdus lorsque le sol est à nouveau labouré.

TABLEAU 3

QUELQUES PRATIQUES AGRICOLES VISANT À STOCKER DU CARBONE DANS LE SOL, LA SUPERFICIE TOTALE DES TERRES TOUCHÉES ET LES TAUX POTENTIELS DE GAIN EN CARBONE SUR 20 ANS

PRATIQUE	SUPERFICIE (10^6 ha)	TAUX (t C ha^{-1} an^{-1})	CERTITUDE ÉLEVÉE, MOYENNE, FAIBLE
Terres cultivées			
1. Diminution du travail du sol	4-6	de 0,0 à 0,4	M
2. Élimination de la jachère	3	de 0,0 à 0,5	É
3. Inclusion d'un plus grand nombre de plantes fourragères dans les rotations culturales	4	de 0,0 à 0,5	M
4. Augmentation du retour des résidus par l'accroissement du rendement (p. ex., amendement par les éléments nutritifs, irrigation, meilleures variétés) ou par le fait d'éviter les prélèvements ou l'incinération	5	de 0,0 à 0,3	M
5. Restauration d'un pâturage ou d'un terrain boisé permanent	1	de 0,2 à 1,0	É
6. Utilisation plus efficace des résidus organiques (p. ex., fumier, biosolides, résidus de culture), particulièrement en vue de restaurer les sols épuisés	1	de 0,1 à 0,5	É
Grand pâturage libre			
1. Amélioration des pratiques de pâturage (p. ex., changements relatifs à la fréquence ou à l'intensité du pâturage)	10	de 0,0 à 0,1	F
2. Augmentation de la productivité (p. ex., amendement par les éléments nutritifs, irrigation, nouvelles espèces)	1	de 0,0 à 0,3	M

L'importance capitale des matières organiques du sol

Fertilité du sol et nutrition des végétaux

En plus du carbone et de l'énergie, les matières organiques du sol contiennent aussi de grandes quantités de phosphore, de soufre et d'azote, trois éléments nutritifs essentiels pour les végétaux. L'azote est le plus important. De fait, la carence en azote constitue le principal facteur limitant la productivité dans les écosystèmes naturels et agricoles. Les pratiques qui favorisent l'accumulation des matières organiques et du carbone dans le sol augmentent également l'apport éventuel en azote, puisque 99 % de l'azote est contenu dans les matières organiques.

Les matières organiques contribuent également à la fertilité des sols grâce à leur influence sur la *capacité d'échange cationique* (CEC) de ceux-ci, c'est-à-dire la capacité d'un sol de conserver les cations, tels que le potassium, un élément nutritif important, et quelques oligoéléments. Dans les sols à texture fine, la CEC dépend en grande partie de la teneur en argile, mais dans certains sols sableux, presque toute la CEC peut être attribuée aux matières organiques du sol.

État physique du sol

Les matières organiques du sol ont une incidence sur les propriétés physiques d'un sol; elles stabilisent sa structure et assemblent ses particules en petits agglomérats appelés *agrégats*. Ainsi, elles contribuent à diminuer l'érosion du sol par l'eau, le vent et le travail du sol. En liant les particules du sol, les matières organiques contribuent également à créer des espaces poreux dans le sol, permettant ainsi à l'air et à l'eau de circuler et favorisant la prolifération des organismes vivants, y compris les végétaux.

L'incorporation continue ou répétée de résidus végétaux dans le sol est une bonne façon de préserver sa stabilité structurale. Les résidus végétaux et les autres résidus organiques favorisent la prolifération microbienne dans le sol, générant ainsi des composés organiques qui lient les particules du sol entre elles. Ces agents liants comprennent la gomme microbienne, les substances humiques, les lipides et les structures microbiennes, telles que les hyphes fongiques filamenteux. Une meilleure agrégation empêche la matière organique en décomposition de se dégrader davantage grâce à un mécanisme de rétroaction. Si les stocks de matières organiques ne sont pas reconstitués de façon régulière, ou si le sol est perturbé par une pluie abondante ou un travail du sol intensif, les agrégats se brisent, ce qui accélère la décomposition des matières organiques et des agents liants qui les composent. Sans les matières organiques, les sols sableux ressembleraient à du sable de plage et de nombreux autres sols seraient durs comme du béton.

Les matières organiques du sol améliorent aussi la capacité de rétention de l'eau. Cette caractéristique est capitale dans le cas des sols sableux, qui, autrement, ne retiendraient qu'une faible quantité d'eau essentielle à la croissance des végétaux.

Une agriculture prospère passe par des sols en bonne santé

En bref, un sol qui contient beaucoup de matières organiques, et donc du carbone, est généralement un sol de meilleure qualité. Par conséquent, préserver ou augmenter les matières organiques du sol apporte des avantages qui débordent largement la problématique de l'atténuation des changements climatiques. Le maintien et la reconstitution des stocks de carbone du sol – qui a fait l'objet de beaucoup de recherches pendant des décennies avant même que les changements climatiques n'occupent le devant de la scène – est simplement une bonne pratique agricole.

LECTURES COMPLÉMENTAIRES

Janzen, H.H., « Soil carbon: A measure of ecosystem response in a changing world? », *Revue canadienne de la science du sol*, 2005, vol. 85, p. 467-480.

Jenkinson, D.S., « The fate of plant and animal residues in soil », p. 505-561, 1981, dans D.J. Greenland et M.H.B. Hayes (éd.), *The chemistry of soil processes*, John Wiley & Sons Ltd., New York.

Smith, P.D., et coll., « Agriculture », p. 487-540 dans B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (éd.), *Climate Change 2007: Mitigation*, Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, 2007.

Swift, M.J., O.W. Heal et J.M. Anderson, *Decomposition in terrestrial ecosystems*, University of California Press, Berkeley, Californie, 1979.

Energy Content of Biofuel. Consulté en ligne le 12 novembre 2007 : <URL : http://en.wikipedia.org/wiki/Energy_content_of_biofuel>.

Les N_2O Oxyde nitreux

COLMATER LES FUITES DANS L'ENVIRONNEMENT

Les végétaux sont plongés dans une mer d'azote – l'air est composé à 78 % d'azote gazeux – et pourtant cet élément nutritif est celui dont les végétaux manquent le plus souvent, ce qui limite leur croissance. Cette carence s'explique du fait que presque tout l'azote dans l'air est de l'azote diatomique ou diazote (N_2), formé de deux atomes d'azote liés entre eux par une solide liaison chimique triple. Ce n'est que lorsque cette liaison est brisée que l'azote peut être utilisé par les végétaux.

Dans la nature, la séparation des atomes de N_2 qui crée de *l'azote réactif* est la plupart du temps le résultat de l'activité de certaines bactéries dans un processus appelé fixation du diazote. Un de ces groupes de bactéries, les rhizobiums, est présent dans les nodosités liées aux racines de légumineuses, comme la luzerne, les haricots et les pois. Une fois *fixé*, l'azote transformé par ces bactéries peut être utilisé par les végétaux. Lorsque ces végétaux se décomposent, ils libèrent cet azote dans le sol au profit d'autres végétaux. Les plantes peuvent aussi être consommées par des animaux; l'azote retourne alors dans le sol lorsque le corps des animaux se décompose ou par la voie des déjections. Le bétail, par exemple, obtient l'azote des protéines qu'il consomme dans ses aliments, puis en excrète la plus grande partie dans l'urine et dans les fèces, retournant ainsi l'azote au sol où il sera réutilisé par des végétaux.

L'avènement des engrais synthétiques

Il y a environ un siècle, les humains ont appris à fixer l'azote de façon industrielle grâce au procédé dit de Haber Bosch, qui utilise des pressions et des températures élevées. Cette découverte a révolutionné l'agriculture, puisqu'elle a donné accès à de grandes quantités d'azote réactif et a permis d'adopter des méthodes plus intensives et plus productives. Près de 40 % de l'azote se trouvant dans les protéines aujourd'hui consommées par les humains partout dans le monde est fixé de façon industrielle.

Malheureusement, l'azote réactif si essentiel aux cultures agricoles est instable. Il y a donc des fuites dans le cycle de l'azote : le nitrate et l'azote organique soluble sont lessivés hors du sol, et des gaz (diazote, ammoniac, N_2O, oxyde nitrique et autres) sont libérés dans l'atmosphère. Ces pertes sont particulièrement fréquentes dans les systèmes agricoles qui utilisent une grande quantité d'azote pour maintenir la productivité et remplacer l'azote qui a été perdu dans les récoltes.

Des fuites qui causent des dégâts

Bon nombre des formes d'azote perdues en raison de ces fuites peuvent causer des dommages écologiques. L'oxyde nitrique et le N_2O, par exemple, risquent d'accélérer la dégradation de la couche d'ozone dans la stratosphère, permettant l'entrée d'une quantité croissante de rayons ultraviolets nocifs. Le nitrate, lorsqu'il est en trop fortes concentrations, peut rendre l'eau impropre à la consommation et occasionner chez les nouveau-nés une méthémoglobinémie, soit le syndrome du bébé bleu; le nitrate peut aussi favoriser la prolifération des algues dans les eaux stagnantes, entraînant la formation de fleurs d'eau. L'ammoniac, lorsqu'il se dépose à nouveau sur la terre ou dans l'eau sous forme de gaz, ou dans la pluie, peut acidifier les sols, nuire à la qualité de l'eau, faire dépérir les forêts et modifier les populations végétales des écosystèmes naturels en les rendant plus vulnérables aux espèces envahissantes.

Dans le présent chapitre, nous nous concentrons sur le N_2O, puisqu'il s'agit d'un gaz à effet de serre (GES) très puissant. Il est environ 300 fois plus puissant que le CO_2. Les émissions d'oxyde nitreux peuvent provenir directement des terres agricoles et du fumier entreposé. Ces émissions sont souvent dites *directes*. Cependant, l'azote sort également des systèmes agricoles sous d'autres formes, par lessivage ou par volatilisation. Cet azote peut constituer une source d'émission de N_2O provenant d'endroits situés à l'extérieur des limites de la ferme. On parle alors d'émissions *indirectes* ou *hors site*, qui doivent aussi faire partie du compte global des émissions de N_2O d'origine agricole.

Bien que les émissions de N_2O ne constituent qu'une faible proportion de l'azote perdu à partir des fermes, elles sont responsables d'environ 50 % du réchauffement attribuable aux émissions de gaz d'origine agricole. Il est donc crucial de trouver des façons d'éliminer les émissions de N_2O si nous voulons réduire les effets de l'agriculture sur le réchauffement de la planète.

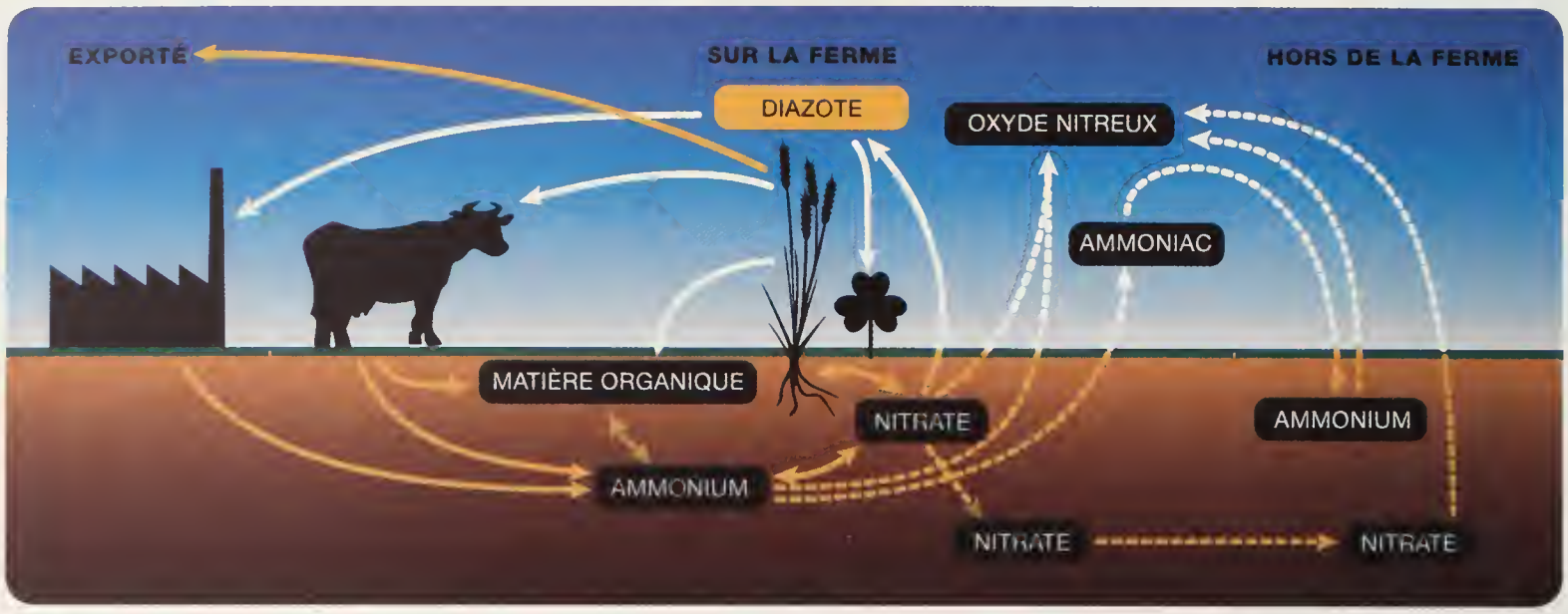
La formation du N_2O

Le cycle de l'azote

L'oxyde nitreux est un produit ou sous-produit de l'activité de microorganismes qui transforment l'azote dans le sol. Pour comprendre ces émissions, nous devons examiner les processus qui permettent à l'azote de circuler dans le sol.

FIGURE 12

REPRÉSENTATION CONCEPTUELLE DU CYCLE DE L'AZOTE DANS LES FERMES DU CANADA



L'oxyde nitreux peut être produit à de nombreux moments au cours du cycle.

L'azote entre dans le sol sous forme organique ou inorganique. Dans le premier cas, il est contenu dans les résidus de cultures, le fumier animal et d'autres matières dérivées des produits végétaux ou animaux. Lorsque ces matières organiques entrent dans le sol, elles sont décomposées par des champignons et des bactéries, qui transforment l'azote en ammoniac, lequel devient de l'ammonium lorsque dissous dans l'eau du sol. L'ammonium peut être absorbé par les végétaux, mais il est généralement converti rapidement en nitrate par les microorganismes dans les sols aérés (c'est-à-dire les sols ayant une teneur élevée en oxygène).

Ainsi, l'azote organique est généralement transformé en ammonium, puis en nitrate, qui s'accumule dans le sol avant d'être absorbé à nouveau par les végétaux. Dans certaines conditions, particulièrement quand les sols sont mal aérés (faible teneur en oxygène), le nitrate peut être *réduit* en diazote gazeux par un processus appelé dénitrification. Ce processus rend l'azote inutilisable pour les végétaux.

Dans les terres agricoles, l'azote du sol est souvent enrichi par de l'azote fixé de façon industrielle, qui est appliqué sous forme d'engrais. Une fois dans le sol, cet azote se comporte de la même façon que l'azote issu de sources organiques. La plupart des engrais contiennent de l'azote sous forme d'ammoniac, d'ammonium, de nitrate ou d'urée. Les trois premières formes s'inscrivent directement dans les processus déjà présentés; l'urée, qui contient une forme d'azote similaire à celle de l'urine, est rapidement transformée en ammoniac dans le sol avant d'entrer dans les mêmes cycles. Ces engrais constituent un apport massif d'azote réactif qui est immédiatement mis à la disposition des plantes et des microorganismes. Puisque les végétaux ne peuvent pas immédiatement absorber cet azote, l'azote demeure en solution ou sous forme gazeuse, ce qui se traduit souvent par davantage d'émissions de N_2O.

En plus du N_2 fixé par les bactéries, d'autres formes d'azote atmosphérique entrent dans le sol, sous forme de gaz ou de particules, ou encore, dans les précipitations. De petites quantités sont fixées par la foudre, mais la majeure partie provient de l'ammoniac ou des autres formes d'azote libérées à partir de sources telles que les fermes d'élevage. Ainsi, la vitesse à laquelle l'azote est déposé sur les sols varie selon la proximité des sources d'azote gazeux. Les dépôts d'azote atmosphérique sont généralement assez faibles en comparaison des quantités provenant d'autres sources.

Peu importe d'où provient l'azote, dès qu'il entre dans le sol sous forme d'ammonium ou de nitrate, il est rapidement absorbé par les végétaux. S'il s'agit de plantes cultivées, il sera exporté en bonne partie dans le produit récolté : grains, fourrage ou produits animaux. Ce transfert constitue de loin la perte d'azote la plus importante pour un système sol-plante. L'azote sera consommé par des humains ou des animaux, excrété, puis minéralisé à nouveau en une forme inorganique. Chaque fois qu'une molécule d'azote est convertie en une forme inorganique, elle est susceptible d'être libérée (perdue) dans l'atmosphère sous forme gazeuse – oxyde nitrique, N_2O, ammoniac et, plus particulièrement, diazote. Ainsi, parfois après de nombreuses transformations, presque tout l'azote qui entre dans le sol à partir de l'atmosphère retournera à l'atmosphère, bouclant ainsi le cycle de l'azote.

En résumé, les molécules d'azote du sol ont une existence mouvementée. Un peu d'azote s'incorpore dans les matières organiques du sol et sera très lentement renouvelé (à intervalles se mesurant en décennies ou en siècles), mais l'essentiel est continuellement transféré ou mis en circulation entre diverses formes organiques et inorganiques. Les allers et venues entre formes organiques et inorganiques peuvent se répéter à de nombreuses reprises avant que l'azote ne quitte le système agricole par le lessivage, les émissions gazeuses ou la récolte des cultures.

Formation du N_2O

L'oxyde nitreux peut être libéré à diverses phases du cycle de l'azote, en grande partie par des processus biologiques. Bien que de nombreux processus biologiques dans le sol puissent former du N_2O dans le sol, on croit que l'essentiel du N_2O émis par le sol provient de deux processus : la nitrification et la dénitrification. En gros, les agents de nitrification oxydent l'ammonium pour en faire du nitrate. La quantité de N_2O produite par unité d'ammonium nitrifié est généralement petite, mais les pertes cumulatives en une année peuvent être importantes. Les agents de dénitrification, quant à eux, transforment le nitrate en N_2O et/ou en diazote. La quantité de N_2O produite par unité de nitrate dénitrifié peut être assez élevée, et la dénitrification est une voie importante d'émission de N_2O à partir des terres agricoles.

Pour approfondir

La nitrification est effectuée par des autotrophes et des hétérotrophes, mais la contribution de ces derniers est considérée comme mineure dans les systèmes agricoles. La nitrification autotrophe se produit en deux phases, chaque phase étant menée par des groupes de bactéries différents. L'oxydation de NH_4^+ en nitrite (NO_2^-), qui est généralement représentée par la formule $NH_4^+ \rightarrow NH_2OH \rightarrow HNO \rightarrow NO_2^-$, est suivie par l'oxydation de NO_2^- en NO_3, qui se fait en une seule étape.

La dénitrification peut être définie comme la réduction dissimilatrice d'oxydes d'azote ioniques en produits gazeux, principalement par l'action des bactéries aérobies dans des conditions d'insuffisance en oxygène. La séquence réactionnelle est généralement représentée par la formule suivante : $NO_3^- \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO \rightarrow N_2O \rightarrow N_2$. La plupart des bactéries dénitrifiantes possèdent tous les complexes enzymatiques des réductases nécessaires pour réduire le NO_3^- en diazote, mais certaines n'ont pas les réductases de N_2O, de sorte que le N_2O est le produit final.

Même les grandes catégories d'*agents de nitrification* et d'*agents de dénitrification* ne sont pas nettement définies, puisque, par exemple, certains agents de nitrification peuvent également dénitrifier (dénitrification par un agent de nitrification). Dans certaines situations, la dénitrification par un agent de nitrification contribue de façon importante à l'émission de N_2O à partir du sol. En outre, du N_2O peut aussi être généré par la réduction dissimilatrice de NO_3^- en NH_4^+ et par d'autres voies biochimiques non identifiées, mais la contribution de ces voies est probablement négligeable dans le cas des terres agricoles canadiennes.

Émissions indirectes de N_2O

L'azote sort des fermes sous bon nombre de formes. Il se perd principalement sous forme de diazote par la voie de la dénitrification, de nitrate par celle du lessivage et d'ammoniac par la volatilisation. Le diazote constitue généralement la plus grande perte, mais ceci ne représente pas un problème environnemental puisque l'azote retourne simplement dans l'atmosphère sous forme de gaz inerte. Le nitrate lessivé et l'ammoniac volatilisé, par contre, constituent des sources importantes de N_2O, par la voie de processus ayant lieu hors site.

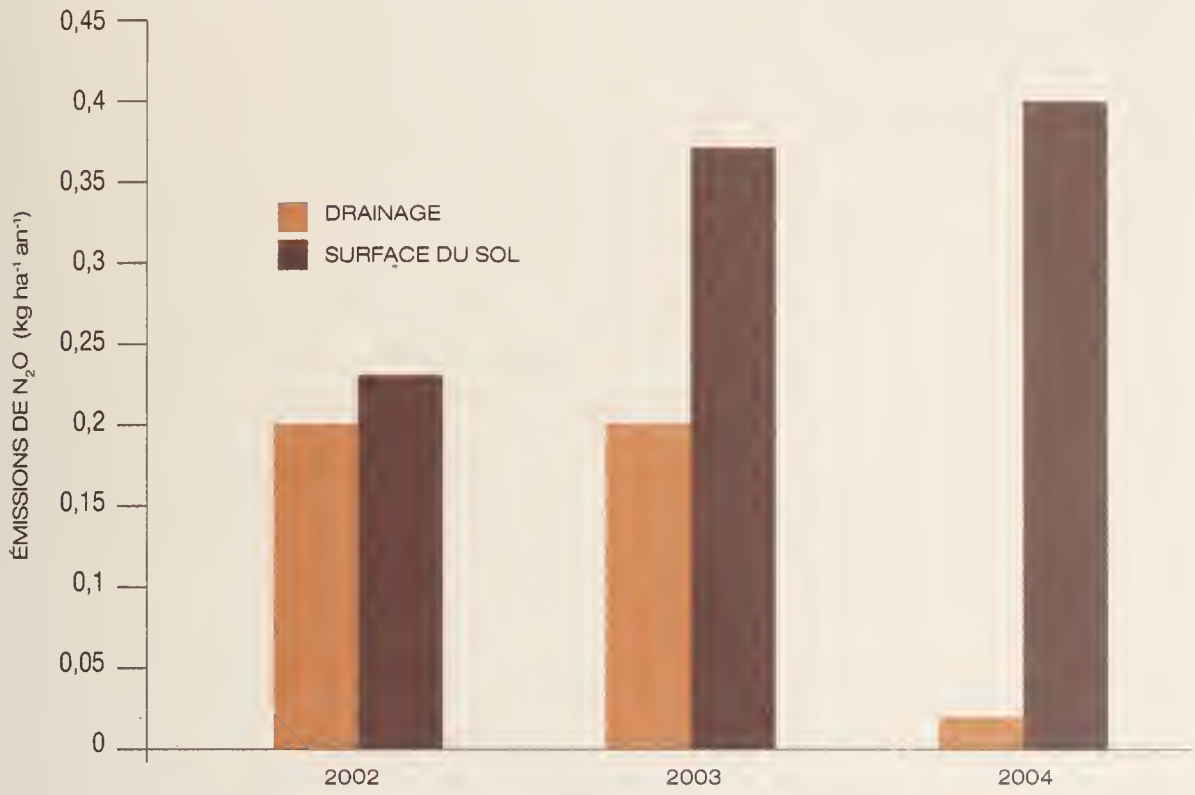
Lessivage du nitrate

Les sols sont chargés négativement et attirent, par conséquent, des ions positifs, tels que l'ammonium, le K^+ et le Ca^{++}. Par contre, le nitrate est chargé négativement et demeure dissous dans l'eau du sol. Si, sous l'effet de précipitations abondantes ou de l'irrigation, l'eau s'écoule dans le sol et atteint les eaux souterraines, le nitrate est également emporté dans cette eau; autrement dit, il est perdu par lessivage et se retrouve dans les eaux souterraines et les cours d'eau. La plupart des pertes de nitrate à partir de tuyaux de drainage se produisent à la fin de l'automne et au début du printemps (entre les saisons de culture).

Bien qu'il soit difficile d'en déterminer la quantité exacte, une fraction du nitrate lessivé à partir de champs agricoles peut être convertie en N_2O, plus loin en aval. Ce N_2O peut provenir du dégazage qui se produit lorsque l'eau de drainage quitte les champs agricoles, ou encore, de la dénitrification si les conditions sont propices.

FIGURE 13

N_2O PROVENANT DE L'EAU DE DRAINAGE



Une partie du N_2O qui est produit dans les sols agricoles peut être dissoute dans l'eau du sol et s'échapper par les tuyaux d'argile. Dans cet exemple, les quantités de N_2O provenant de l'eau de drainage peuvent être aussi grandes que les émissions de N_2O produites à la surface du sol.

Source : D. Burton, Collège d'agriculture de la Nouvelle-Écosse, Truro (Nouvelle-Écosse)

Quelle est la quantité moyenne d'azote perdue chaque année en raison du lessivage des terres agricoles du Canada? Les estimations des pertes moyennes varient grandement : d'aussi peu que 2 kilogrammes d'azote par hectare dans la région sèche des Prairies canadiennes à jusqu'à 30 kilogrammes d'azote par hectare dans les régions humides; les valeurs pour les provinces du Centre se situent quelque part entre les deux. Au Canada, les pertes indirectes de N_2O liées au lessivage du nitrate représentent environ 9 % des émissions totales de N_2O issues de sources agricoles.

Volatilisation de l'ammoniac

L'ammoniac est produit à partir de l'ammonium qui est dissous dans l'eau. Ainsi, de petites quantités d'ammoniac peuvent être produites, partout où de l'ammonium est en solution : dans les sols, les plantes en croissance et même le souffle des animaux. Sans surprise, la majorité de l'ammoniac libéré à partir des fermes provient de sources à concentration élevée : l'urine du bétail, qui contient de fortes concentrations d'urée, qui se transforme rapidement en ammonium par hydrolyse; le fumier animal, qui contient non seulement de l'urine, mais aussi de l'ammonium provenant des excréments en décomposition et des matériaux de litière; les engrais à base d'ammonium et les résidus de récolte qui libèrent de l'ammonium lorsqu'ils se décomposent.

La quantité d'ammoniac libérée par les exploitations agricoles varie, de traces négligeables à des panaches concentrés pouvant être détectés à l'odeur. Les facteurs les plus importants qui influent sur la quantité des émissions comprennent les suivants : la concentration d'ammonium en solution, qui influe sur l'intensité de la source d'ammoniac; le pH de la solution, qui détermine l'abondance relative d'ammoniac et d'ammonium; le degré de contact de la solution avec l'atmosphère, qui a une incidence sur la facilité avec laquelle l'ammoniac est émis dans l'atmosphère.

Une grande partie de l'ammoniac qui est transporté dans l'atmosphère finit par retourner au sol gazeux ou être dissoute dans les précipitations. Ce phénomène est d'intérêt pour l'étude des émissions de GES, puisque l'ammoniac déposé à nouveau a une incidence sur la nitrification et la dénitrification, qui peuvent dégager du N_2O. Nous estimons que cette source indirecte de N_2O est responsable d'environ 9 % des émissions nationales de N_2O qui sont d'origine agricole.

Facteurs qui déterminent la formation de N_2O

La quantité de N_2O émise par le sol est déterminée par la vitesse à laquelle le N_2O est produit et la proportion du N_2O produit qui est vraiment libérée à partir de la surface du sol. Ces deux facteurs sont déterminés à l'échelle cellulaire en fonction des réserves de matières premières et des conditions environnementales prédominantes. Bien sûr, l'azote minéral constitue un facteur essentiel de la nitrification et de la dénitrification par les microorganismes du sol, mais les agents de dénitrification ont également besoin de matières organiques facilement décomposables. Pour cette raison, il est possible que des taux élevés d'émission de N_2O ne soient pas observés après l'épandage d'azote minéral dans les sols ayant une faible teneur en matières organiques.

Teneur en eau

Puisque la teneur en eau du sol influe fortement sur la quantité d'oxygène présente dans le sol ainsi que sur la présence d'éléments nutritifs, sur l'activité microbienne et même sur la température du sol, elle est considérée comme le principal facteur déterminant des émissions de N_2O provenant du sol. La variation considérable de la quantité des précipitations saisonnières d'une extrémité à l'autre de la zone agricole du Canada fait également varier beaucoup l'ampleur des émissions de N_2O provenant du sol. Par exemple, les émissions de N_2O dans les prairies semi-arides à subhumides ont tendance à être beaucoup moins élevées que les émissions des régions les plus humides de l'Est du Canada. Ce n'est pas surprenant, puisque l'aération du sol constitue un important régulateur d'émissions de N_2O et que celle-ci est très influencée par la quantité d'eau dans le sol.

La configuration des précipitations peut aussi avoir une incidence sur la configuration des émissions saisonnières de N_2O. Une grande accumulation de neige isole le sol et maintient les températures à la surface près du point de congélation ou juste en dessous. Cela permet à l'activité microbienne de se poursuivre de façon réduite pendant l'hiver, ce qui entraîne parfois d'importantes émissions printanières de N_2O. Par contraste, dans la région sèche des Prairies où il tombe relativement peu de neige, les températures à la surface du sol peuvent chuter à -20 °C, ce qui donne lieu à des émissions négligeables. De plus, une quantité moins élevée de neige en hiver signifie que le sol s'assèche plus rapidement au printemps, ce qui entraîne une émission printanière de N_2O relativement petite.

Type de sol, paysage et climat

On peut dire que les émissions de N_2O issues des terres agricoles du Canada sont généralement faibles, mais assez constantes et ponctuées d'épisodes où elles sont beaucoup plus élevées. Dans les régions les plus sèches du pays, les émissions proviennent sans doute en grande partie de la nitrification, et leur ampleur est liée au renouvellement de l'azote total. Dans les régions les plus humides, les émissions sont davantage le fait d'une combinaison de nitrification et de dénitrification. Les épisodes d'émissions élevées de N_2O sont généralement déclenchées par une teneur élevée en eau dans le sol, après une chute de pluie, une irrigation ou la fonte de la neige.

La teneur en eau du sol – et donc les émissions de N_2O – varient aussi selon des facteurs, tels que la texture du sol, le drainage et la position dans le paysage. Dans certains cas, les scientifiques ont trouvé que le drainage et la texture du sol pouvaient expliquer jusqu'à 86 % des différences annuelles de dénitrification. À mesure que la quantité de particules d'argile augmente dans les sols, l'infiltration de l'eau ralentit et la teneur en eau du sol s'élève. Par conséquent, des scientifiques ont fait état d'émissions de N_2O qui étaient en moyenne deux fois plus élevées sur des sols argileux que sur des sols loameux et sableux.

L'eau ne se distribue pas également sur l'ensemble du territoire; elle s'écoule à partir des endroits les plus élevés et s'accumule dans les zones de dépression. Ainsi, dans les zones de dépression humides, les émissions de N_2O sont plus élevées que dans les zones sèches en amont.

FIGURE 14

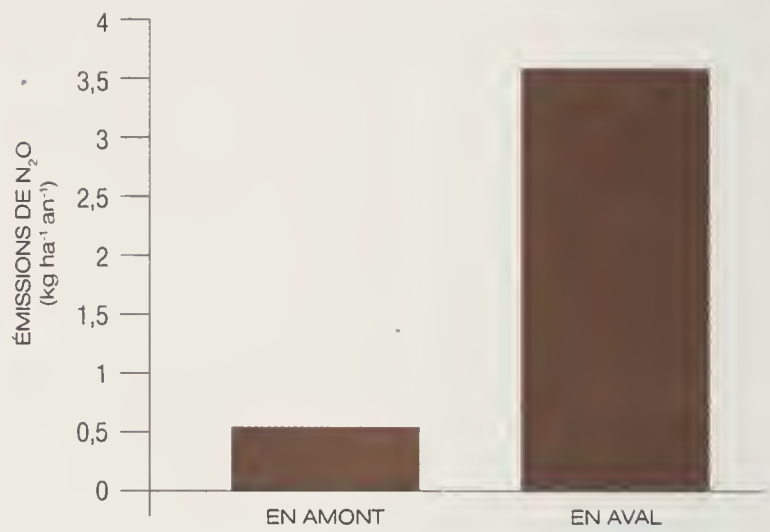
Émissions cumulatives de N2O provenant de sols sableux et argileux situés près de Québec

Les sols composés de particules fines (argile) émettent habituellement une plus grande quantité de N_2O que les sols sableux. Les matières argileuses ralentissent l'infiltration de l'eau et forment des sols humides qui sont mal aérés. Ces conditions favorisent la dénitrification et des taux élevés de production de N_2O.

Source : P. Rochette, AAC, Québec (Québec)

FIGURE 15

Émissions cumulatives de N2O (mars-octobre) à partir des emplacements supérieurs et inférieurs (dépressions) d'un paysage situé près de Mundare, en Alberta



Les deux secteurs de la pente ont été ensemencés en vue de faire pousser du blé de printemps et ont été fertilisés avec 60 kilogrammes d'azote. Les conditions plus humides de l'emplacement inférieur ont entraîné des conditions d'aération pauvre et des émissions élevées de N_2O.

Source : R. Lemke, AAC, Saskatoon (Saskatchewan)

Réduire au minimum les émissions de N_2O issues des terres agricoles

Nous avons vu, plus tôt dans le présent chapitre, que la production de N2O dans les sols est fonction de deux principaux facteurs : la quantité d'azote minéral disponible dans le sol pour les réactions de nitrification et de dénitrification et le degré d'aération du sol, qui favorise ou non la dénitrification, source la plus importante de N_2O.

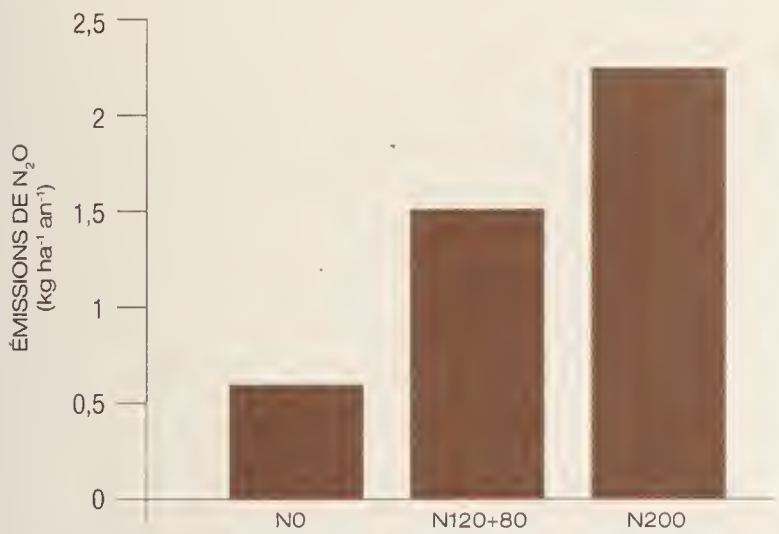
Les sections suivantes présentent quelques idées pour gérer les terres agricoles de façon à réduire au minimum les émissions de N_2O.

Gestion de l'azote

Dans les milieux naturels, l'azote est souvent l'élément qui limite la croissance des végétaux. L'azote présent dans le sol de ces écosystèmes provient surtout de la décomposition des matières organiques du sol et des débris végétaux (feuilles mortes, racines, arbres morts), et les racines des végétaux l'absorbent rapidement lorsqu'il devient disponible. La teneur en azote minéral de ces sols est généralement faible. Par conséquent, les émissions de N_2O sont très faibles.

FIGURE 16

Émissions cumulatives de N_2O provenant d'un champ de pommes de terre situé à Frederiction, au Nouveau-Brunswick



On a comparé des parcelles d'essai n'ayant reçu aucun engrais azoté (N0) à des parcelles ayant reçu au moment de la plantation 200 kg d'azote par hectare (N200) ou 120 kg d'azote par hectare, et au moment du buttage final, 80 kg d'azote par hectare (N120+80). L'épandage de l'engrais azoté a entraîné une hausse des émissions puisqu'il a permis aux microorganismes du sol d'avoir accès à une plus grande quantité d'azote minéral dans le sol. Par contre, faire en deux temps l'épandage de l'engrais total requis a permis de réduire les quantités d'azote dans le sol ainsi que les émissions de N_2O.

Source : D. Burton, Collège d'agriculture de la Nouvelle-Écosse, Truro (Nouvelle-Écosse)

La situation est différente dans les champs agricoles. Toutes les cultures contiennent de l'azote. Par exemple, il y a approximativement 10 kg d'azote dans chaque tonne de maïs ou de blé. Lorsque les cultures sont récoltées, de grandes quantités d'azote partent avec elles et doivent être remplacées pour maintenir la fertilité du sol. Autrement dit, la fertilisation des terres agricoles est un élément essentiel de la plupart des systèmes de culture, et l'azote issu des engrais constitue l'une des plus importantes sources d'émissions de N_2O.

Pourquoi est-ce le cas? Les racines des végétaux et les microorganismes dénitrifiants consomment les mêmes formes d'azote : l'ammonium et le nitrate. Par conséquent, les engrais ne peuvent pas être mis à la disposition des racines des végétaux sans l'être aussi pour les microorganismes producteurs de N_2O. L'élimination complète des émissions de N_2O issues des terres agricoles n'est donc pas un objectif réaliste. Notre but est plutôt de les réduire en nous assurant que la plus grande quantité possible de l'azote contenu dans les engrais est absorbée par les cultures, et non pas transformée par les microorganismes.

Comment peut-on atteindre cet objectif? La gestion des intrants agricoles suivants pourrait aider.

Engrais minéraux

Si nous voulons réduire les émissions de N_2O en maîtrisant la façon dont les engrais sont appliqués, il est sensé de miser sur une grande stratégie : appliquer seulement la quantité d'engrais dont ont besoin les végétaux, et l'appliquer au bon moment, pour que l'engrais soit absorbé par les végétaux et non décomposé par les microorganismes.

L'azote destiné aux cultures provient de deux sources : les engrais (minéraux et organiques) et les résidus de culture. Les engrais servent à combler l'écart entre les besoins en azote des végétaux et l'azote libéré par la décomposition des résidus de culture. Par exemple, si des légumineuses ont été plantées lors de la période de végétation antérieure, la décomposition de celles-ci entraînera la libération de 25 à 100 kilogrammes d'azote par hectare durant la saison de croissance. Il faut en tenir compte dans le calcul des besoins globaux en engrais azoté de toute culture donnée.

Les premières semaines suivant la plantation, les jeunes plants consomment relativement peu d'azote. Pendant la période de croissance rapide, ils en consomment beaucoup. Lorsqu'ils arrivent à maturité, ils n'en consomment plus du tout. Par conséquent, plutôt que d'appliquer la totalité de l'engrais azoté prévu pour une saison au moment de l'ensemencement, l'épandage devrait se faire en deux temps : une partie pourrait être épandue au moment de l'ensemencement, et le reste lorsque la culture est en période de croissance rapide. Il est impossible de synchroniser parfaitement la fertilisation et la croissance des végétaux, mais il vaut vraiment la peine d'envisager l'épandage en plusieurs temps pour réduire les quantités d'azote minéral dans les sols et les émissions de N_2O. Cette pratique n'est toutefois pas efficace dans toutes les régions du Canada. Par exemple, dans les prairies semi-arides, les réductions possibles des émissions de N_2O ne justifieraient probablement pas l'énergie dépensée pour l'opération additionnelle.

La forme et le mode d'épandage des engrais peuvent aussi avoir une influence sur l'efficacité avec laquelle les cultures utilisent l'azote, et donc influer sur les quantités de N_2O produites. Il est important que les racines des végétaux aient facilement accès aux engrais. Par conséquent, l'épandage en surface n'est pas le plus efficace. L'épandage en bandes à proximité des lignes de semis améliore généralement l'assimilation de l'azote par les cultures, mais la profondeur à laquelle l'engrais est épandu est à surveiller. Dans une étude menée sur un sol de loam argileux dans le sud-ouest de l'Ontario, l'application des engrais azotés en bandes à une profondeur de 2 cm a permis de réduire de 25 % les émissions de N_2O comparativement à un épandage à une profondeur de 10 cm. Une des raisons pourquoi les émissions de N_2O étaient plus élevées lorsque les engrais azotés étaient épandus plus profondément est que les couches profondes du sol deviennent anaérobiques plus fréquemment, parce qu'elles sont plus humides. La dénitrification était donc favorisée.

Si l'épandage des engrais se produit dans des conditions d'aération imparfaite (sols très humides ou compactés), un engrais à base d'ammonium est préférable, car, à court terme, il réduit les risques de dénitrification, principale source de N_2O. Inversement, dans un sol bien aéré, la forme du nitrate entraînera moins d'émissions de N_2O.

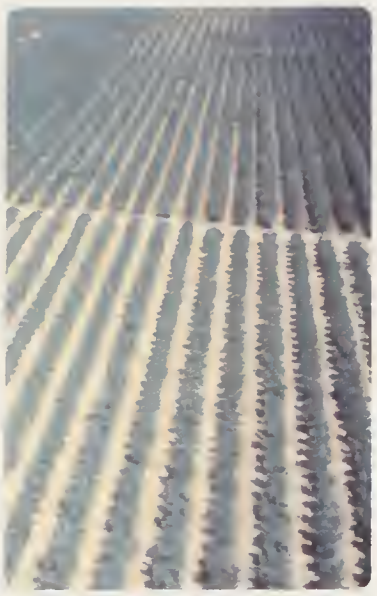
Comme le nom l'indique, les engrais à libération lente libèrent l'azote lentement, à une vitesse qui est mieux-adaptée au taux d'absorption des cultures. Cela empêche l'azote minéral de s'accumuler en quantité dans le sol et réduit ainsi la production possible de N_2O. D'autres substances, lorsqu'elles sont ajoutées au sol, freinent la nitrification et maintiennent plus longtemps l'azote épandu sous forme d'ammonium, ce qui entraîne une réduction des émissions de N_2O.

Azote du fumier

Les aliments pour animaux de ferme sont souvent riches en protéines. L'ammoniac que ces animaux libèrent lorsqu'ils digèrent ces protéines leur est toxique, et il est rapidement excrété dans leur urine sous forme d'urée ou d'acide urique. Ce qu'il advient de cet azote dépend des conditions trouvées dans les diverses installations d'entreposage du fumier. Comme la nitrification exige de l'oxygène, la majeure partie de l'azote minéral demeurera sous forme d'ammonium s'il est entreposé dans un endroit sans oxygène. Cette condition se retrouve dans les installations de stockage du fumier liquide, et une quantité nulle ou très faible de N_2O est produite et émise à partir des citernes et des lagunes à purin. La situation est très différente dans les milieux aérés, comme les installations d'entreposage du fumier solide. Du N_2O est produit dans les tas de fumier pendant la nitrification de l'ammonium, et encore davantage si les conditions deviennent anaérobiques et qu'une partie du produit de la nitrification, le nitrate, est ensuite dénitrifié.

Le traitement du fumier peut également influer sur les émissions de N_2O pendant son entreposage. Par exemple, si le compostage statique et l'entreposage ordinaire en tas de fumier produisent des niveaux d'émissions comparables, le compostage avec remuement fréquent peut entraîner des émissions 10 fois plus abondantes. Ce décuplement des émissions de N_2O est le résultat de l'arrivée de nitrates ayant été produits sur le pourtour aéré du tas de fumier au cœur de celui-ci, où il y a moins d'oxygène, ce qui favorise la dénitrification.

Les excrétions des animaux contiennent de grandes quantités d'azote qui peuvent être utilisées pour fertiliser les cultures. Lorsque le fumier est épandu sur le sol, l'azote qu'il contient fait augmenter les émissions de N_2O comme le font les engrais minéraux. Par conséquent, les mesures recommandées pour accroître l'assimilation de l'azote synthétique par les cultures s'appliquent aussi à l'azote du fumier. Une utilisation efficace de l'azote du fumier permet aux agriculteurs de réaliser des économies appréciables en engrais minéral, et aussi de réduire de façon considérable les émissions de N_2O, puisqu'une moins grande quantité d'engrais synthétiques doit être épandue.



Cultures de légumineuses

Les cultures de légumineuses, telles que le soja et la luzerne, fixent l'azote présent dans l'air à l'aide d'une bactérie présente sur leurs racines, appelée rhizobium. Ce microorganisme convertit le diazote atmosphérique en ammonium utilisable par les végétaux. Jusqu'à tout récemment, on croyait que cette fixation de l'azote s'accompagnait d'une libération importante de N_2O, mais des études récentes réfutent cette hypothèse.

Les résidus des cultures de légumineuses qui sont retournés à la terre après la récolte sont relativement riches en azote; leur décomposition favorise une production de N_2O plus élevée que celle des résidus de végétaux non fixateurs d'azote. Cependant, cette production est généralement faible en comparaison des émissions générées par les cultures qui requièrent l'épandage d'engrais azotés.

Cultures couvre-sol

L'assimilation de l'azote par les végétaux constitue un important puits d'azote du sol. En l'absence de cultures, l'azote minéral peut s'accumuler et se perdre dans l'environnement sous plusieurs formes, y compris le N_2O. Les cultures vivaces ont une longue période de végétation, et peu d'azote du sol s'accumule dans ces systèmes. Quant aux cultures annuelles, elles assimilent peu d'azote au début de la saison et après être arrivées à maturité ou avoir été récoltées. L'accumulation de l'azote minéral libéré par la décomposition des matières organiques du sol et des résidus de culture pendant ces périodes peut mener à d'importantes émissions de N_2O. Les cultures couvre-sol plantées après la récolte de cultures annuelles absorbent l'azote à l'état libre dans le sol, empêchant ainsi son accumulation et réduisant de ce fait les pertes de N_2O. Les cultures couvre-sol ne sont peut-être pas une option viable dans les régions plus arides du pays où la conservation de l'humidité du sol revêt une importance capitale.

Cependant, la gestion des cultures est essentielle à l'efficacité de cette pratique. L'azote stocké dans les tissus des cultures couvre-sol doit être libéré dans le sol au moment où il sera absorbé par les cultures. Il serait donc logique d'attendre au printemps suivant avant de labourer les cultures couvre-sol dans la terre.

Aération du sol

Comme nous l'avons vu, le N_2O est produit en beaucoup plus grande quantité dans les sols qui contiennent peu d'oxygène. Ces sols comprennent ceux qui ont une teneur élevée en eau et ceux qui sont compactés. Les sols pauvres en matières organiques ont également des propriétés qui font en sorte que l'aération est souvent limitée; les racines, les lombrics et les insectes y creusent moins de tunnels. Ces sols ont également tendance à se compacter plus facilement.

Les pratiques de gestion des sols peuvent réduire au minimum la libération de N_2O en raison de leur incidence sur la teneur en eau des sols, la teneur en matières organiques des sols et le compactage des sols. Les principes généraux, comme nous l'avons vu précédemment, peuvent guider le choix de pratiques de gestion qui assurent assez

d'eau pour une croissance optimale des cultures, tout en maintenant une aération adéquate du sol de façon à limiter les taux de dénitrification et la production de N_2O.

Travail du sol

Traditionnellement, la préparation du lit de semence et le désherbage des champs agricoles se faisaient au moyen d'un travail du sol vigoureux. Dans l'Est du Canada, les charrues à socs et versoirs, suivies par des passages de herses, incorporent les résidus de la récolte précédente au sol et ameublissent le sol de surface en vue de l'ensemencement. Dans les cultures en rangées, le désherbage qui a lieu pendant la période de végétation est souvent accompli par des passages périodiques de herses adaptées. En raison de l'environnement sec et des sols friables des Prairies canadiennes, la préparation du lit de semence était traditionnellement effectuée grâce à des passages successifs de cultivateurs agricoles et/ou de herses.

Un travail vigoureux du sol requiert du temps, de l'énergie et des ressources, détruit la structure des sols et expose la couche superficielle à l'érosion. La réduction ou l'élimination du travail du sol évitent ces problèmes. Il s'agit de faire une utilisation limitée des instruments de travail du sol; on sème souvent à travers les résidus de culture laissés à la surface du sol par la récolte de l'année précédente. Par rapport à la méthode traditionnelle, la méthode sans travail du sol présente plusieurs différences importantes qui peuvent influer sur la production et l'émission de N_2O.

Dans la méthode sans labour, les résidus de culture, les engrais et les fertilisants organiques sont laissés en surface plutôt qu'incorporés au sol. Leur décomposition et les transformations de l'azote minéral se font donc à des températures et à des conditions d'humidité différentes. L'absence de remuement rend également les sols plus denses, et la présence des résidus à la surface réduit l'évaporation et augmente la teneur en eau du sol. Ceci réduit l'aération du sol, qui augmente souvent les taux de dénitrification et le potentiel de production de N_2O. Cependant, l'effet de la méthode sans labour sur la dénitrification et la production de N_2O s'observe surtout dans les climats les plus humides et particulièrement dans les sols argileux. Au Canada, il semble que, de façon générale, la méthode sans labour accroît les émissions de N_2O dans les régions humides de l'Est, alors qu'elle les réduit dans les régions semi-arides des Prairies.

Irrigation et drainage

Nous avons vu à quel point la teneur en eau d'un sol était importante pour son aération; il est donc facile de comprendre pourquoi le drainage et l'irrigation influent sur l'aération. Une irrigation abondante nuit à l'aération du sol. Une irrigation moins abondante mais plus fréquente évite le trop-plein d'eau dans le sol et donc réduit les émissions de N_2O. De même, un drainage lent des excédents d'eau dans les terres agricoles entraîne une aération pauvre, ce qui mène à la dénitrification et à la production de N_2O. Une bonne structure de sol qui permet à l'eau d'entrer rapidement et un drainage artificiel qui assure de bonnes conditions pour la croissance des cultures aident également à éviter des émissions élevées de N_2O.

Jachère

Dans le sud des Prairies canadiennes, la croissance des cultures est limitée par les faibles précipitations. Pour atténuer le problème, on pratique la jachère depuis que les premiers colons se sont installés sur les terres il y a près de 100 ans. Cette pratique consiste à ne faire pousser aucune végétation sur une terre pendant une période de végétation complète. Pendant les années de jachère, l'absence de végétaux réduit l'évaporation et permet de refaire le plein des réserves en eau du sol de façon à assurer une récolte satisfaisante à la campagne agricole suivante. Lorsqu'une terre est mise en jachère, le sol est plus humide, mais il est aussi plus chaud, puisqu'il est directement exposé au rayonnement solaire. Ces conditions favorisent la décomposition biologique des matières organiques du sol et l'accumulation de l'azote minéralisé qui, en l'absence de végétaux pour l'absorber, peut stimuler la production de N_2O par les microorganismes.

En effet, il a été montré que les émissions de N_2O issues de sols en jachère sont d'ampleur similaire à celles issues des terres cultivées qui reçoivent des engrais azotés. Récemment, l'adoption des systèmes avec peu ou pas de préparation du sol a permis de rendre plus efficace la consommation d'eau des cultures et de réduire le recours à la jachère. Cette pratique a permis d'accroître la production agricole sans augmenter la production globale de N_2O.

Réduire les émissions indirectes

Les pratiques dont nous venons de parler peuvent aider à réduire les émissions *directes* de N_2O. La réduction des émissions *indirectes*, c'est-à-dire celles émises à l'extérieur des terres agricoles mais à partir de l'azote provenant des fermes, demande de réduire le lessivage et la volatilisation. Puisque ces pertes sont très coûteuses sur le plan économique et environnemental, de nombreuses études ont été menées dans le but de trouver des façons de les réduire.

Réduire au minimum l'utilisation des engrais

Comme le montre le tableau 4, un grand nombre de pratiques ont été prônées, celles-ci étant regroupées en deux grandes approches. Afin de réduire les émissions issues des champs agricoles, la plus élémentaire consiste à épandre juste assez d'azote pour satisfaire aux besoins des cultures, mais sans plus. L'approche est simple en principe, mais difficile à réaliser en raison de la complexité biologique et de la variabilité du cycle de l'azote dans les fermes. Par exemple, les quantités d'azote dont disposent les cultures varient non seulement en fonction des quantités épandues, mais aussi en fonction de la vitesse à laquelle l'azote organique déjà présent se minéralise, ce qui est un processus difficile à prévoir. En outre, il est impossible de prévoir les quantités d'azote dont ont besoin les végétaux et le moment où ils en auront besoin, puisque cela varie selon la météo et d'autres facteurs qui jouent sur la croissance des végétaux.

TABLEAU 4

Approches possibles pour réduire au minimum les pertes agricoles d'azote par le lessivage et la volatilisation de l'ammoniac

APPROCHE	EXEMPLES DE PRATIQUES
Réduire au minimum les pertes provenant du sol	
Éviter d'épandre une trop grande quantité d'azote	Meilleures recommandations fondées sur des analyses du sol ou des calculs du bilan de l'azote
	Épandre l'azote selon des quantités variables qui correspondent aux besoins des végétaux (agriculture de précision)
	Adopter des méthodes plus efficaces pour permettre à l'azote de se rendre aux végétaux (p. ex., épandage en bandes)
Faire correspondre les ajouts d'azote aux besoins des végétaux	Choisir de meilleurs moments pour épandre le fumier et les engrais
	Choisir de meilleurs moments pour incorporer les résidus
	Choisir de meilleures formes d'engrais (p. ex., engrais à libération lente)
	Utiliser des cultures couvre-sol
	Éviter la mise en jachère
Réduire au minimum les pertes à partir du bétail	
Conserver l'azote du fumier au moment du stockage	Recouvrir physiquement les tas de fumier
	Amendements chimiques (p. ex., agents acidifiants)
	Pratiques de compostage consciencieuses
Empêcher les pertes subies après l'épandage	Meilleur épandage de l'azote de fumier (p. ex., épandage en bandes)
	Incorporation du fumier au moment opportun

Pour que les pertes soient réduites au minimum, l'azote doit être disponible non seulement en bonne quantité, mais aussi au bon moment. Il est possible d'y parvenir en épandant l'azote juste avant qu'il ne soit assimilé par les végétaux (p. ex., éviter la fertilisation automnale des cultures semées au printemps), en utilisant des engrais à libération contrôlée ou en enfouissant des résidus riches en azote de façon à synchroniser la minéralisation avec les besoins des végétaux. Souvent, les pertes d'azote peuvent être réduites grâce à des méthodes, telles que l'*épandage en bandes*, qui consistent à placer l'azote en contact direct avec le sol et près des racines. Il est possible de réduire dans une certaine mesure les pertes entre les cultures en plantant des cultures couvre-sol et en évitant la mise en jachère, qui favorise l'accumulation du nitrate dans le sol en l'absence de plantes pour l'absorber.

Gérer le bétail

Les systèmes d'élevage sont aussi une importante source de perte d'azote, notamment sous forme d'ammoniac produit à partir des composés d'urée excrétés. Environ 50 % de l'azote contenu dans les aliments consommés par le bétail, par exemple, est excrété dans l'urine. L'approche la plus fondamentale pour enrayer ces pertes est de réduire au minimum l'azote excrété en ajustant la quantité et la nature des protéines contenues dans le régime des animaux. Dans le rumen du bétail, les protéines se décomposent généralement en ammoniac, lequel est ensuite utilisé par la flore ruminale pour synthétiser les protéines microbiennes, soit la principale source de protéines de l'animal ruminant. Si une trop grande quantité de protéines dégradables dans le rumen est consommée, ou si une carence en énergie (glucides) limite la croissance bactérienne, l'ammoniac non utilisé est transféré dans le sang avant d'être excrété dans l'urine.

Sans compromettre la productivité des animaux, les protéines alimentaires peuvent être réduites par l'amélioration de l'équilibre entre les protéines dégradées dans le rumen qui ont été consommées et les matières organiques fermentescibles dans le rumen. Cela maximise l'apport en protéines microbiennes. Une autre façon de réduire l'excrétion d'azote est d'assurer un apport en acides aminés dans l'intestin grêle des animaux en leur offrant une alimentation riche *en protéines non dégradables* (ce qu'on appelle aussi des protéines digestibles dans l'intestin grêle ou des protéines soustraites à la dégradation ruminale). Une alimentation où la teneur en protéines brutes est réduite et où certains acides aminés sont ajoutés de façon à répondre aux besoins alimentaires s'est avérée efficace pour réduire les excrétions d'azote totales chez la volaille et les porcs.

Cependant, chez le bétail ruminant (bovins), les acides aminés contenus dans les aliments doivent être protégés contre la dégradation ruminale. Certaines sources de protéines consistent en un pourcentage relativement élevé de protéines non dégradables. Il faut veiller à ce que la quantité de protéines non dégradables dans les aliments ne soit pas excessive, puisque l'azote excédentaire est excrété dans l'urine. Idéalement, le régime devrait optimiser l'apport en protéines dégradables dans le rumen, tout en évitant de donner une alimentation trop riche en protéines non dégradables, c'est-à-dire sans excéder les besoins en matière de croissance et de maintien. Ces pratiques, cependant, doivent encore faire l'objet de recherches approfondies afin de s'assurer qu'elles ne mettent pas en péril le rendement en produits carnés et laitiers.

Les pertes d'azote sous forme d'ammoniac volatil provenant de tas de fumier peuvent être maîtrisées efficacement par l'installation de barrières physiques, l'utilisation d'amendements chimiques (p. ex., acidulants, absorbants) et l'ajustement des conditions au moment de l'entreposage ou du compostage. Les pertes d'azote qui proviennent du fumier et qui se produisent après l'épandage peuvent être réduites par des méthodes similaires à celles présentées pour les autres sources d'azote; il est particulièrement important d'incorporer le fumier de façon efficace et au moment voulu afin d'éviter la volatilisation de l'ammoniac.

Les meilleures approches pour réduire les pertes varient entre les régions et même entre les fermes d'une même région. Cela dit, de nombreuses études ont montré qu'il est rare de récupérer plus de 50 % de l'azote appliqué aux cultures, ce qui laisse supposer qu'il est encore possible de réduire considérablement l'épandage d'engrais azotés ainsi que les émissions indirectes de N_2O.

Autres avantages et coûts de la réduction des émissions de N_2O

Les méthodes visant à réduire les émissions de N_2O peuvent avoir de nombreux autres avantages; en effet, ces méthodes sont généralement adoptées non pas pour éliminer les émissions de N_2O, mais plutôt pour réduire les apports d'azote et ainsi réduire les coûts agricoles. Parmi les autres avantages, notons la réduction du lessivage du nitrate, l'amélioration de la qualité de l'air (par la réduction des aérosols formés à partir de l'ammoniac), une meilleure élimination des odeurs et la réduction de l'énergie utilisée pour fabriquer et épandre les engrais azotés. (Ceci réduit également les émissions de CO_2.)

Par contre, ces pratiques peuvent aussi avoir des inconvénients. Certaines exigent d'investir dans l'infrastructure ou l'équipement; d'autres, particulièrement celles visant à réduire les taux d'épandage, risquent parfois de faire baisser le rendement de culture. Elles sont aussi susceptibles d'aller à l'encontre d'autres objectifs environnementaux. Ainsi, l'incorporation efficace du fumier pourrait nécessiter un travail intensif qui peut réduire la qualité du sol, et le fait d'éviter les pertes d'ammoniac provenant du fumier pourrait simplement retarder les pertes d'azote ou accroître les pertes sous d'autres formes (p. ex., le N_2O). Par conséquent, les pratiques éventuelles de réduction des émissions indirectes de N_2O ne peuvent être évaluées efficacement qu'à la lumière d'autres objectifs agricoles et environnementaux.

Malgré les avantages considérables des pratiques qui visent à éviter les pertes d'azote – et en dépit des nombreuses recherches consacrées à la réduction de ces pertes –, le cycle de l'azote sur les fermes a encore des fuites, et ces fuites sont encore à l'origine d'émissions considérables (quoique mal quantifiées) de N_2O. Colmater ces fuites demeure un objectif de recherche important, tant pour améliorer la productivité que pour éviter des dommages écologiques. Étant donné la complexité du cycle de l'azote et la lenteur des progrès réalisés jusqu'ici, les gains d'efficacité seront sans doute très progressifs, mais les efforts investis en vaudront la peine.

LECTURES COMPLÉMENTAIRES

Beauchamp, E.G., « Nitrous oxide emission from agricultural soils », *Revue canadienne de la science du sol*, 1997, vol. 77[2], p. 113-123.

Erisman, J.W., A. Bleeker, J. Galloway et M.S. Sutton, « Reduced nitrogen in ecology and the environment », *Environmental Pollution*, 2007, vol. 150, p. 140-149.

Freney, J.R., « Emission of nitrous oxide from soils used for agriculture », *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, vol. 49[1/3], p. 1-6.

Mosier, A.R., et coll., « Assessing and mitigating N_2O emissions from agricultural soils », *Climatic Change*, 1998, vol. 40[1], p. 7-38.

Les gaz
Méthane

LE MÉTHANE PRODUIT PAR LE BÉTAIL ET LES MÉTHODES DE RÉDUCTION DES ÉMISSIONS

Le CH_4 est un gaz incolore et inodore qui nous est familier, car c'est la principale composante du gaz naturel que nous utilisons pour chauffer nos maisons. Dans la nature, le méthane est produit par la décomposition des matières végétales lorsque l'oxygène manque pour la formation de CO_2. Dans les exploitations agricoles du Canada, on retrouve de telles conditions essentiellement à deux endroits : dans le premier estomac (c'est-à-dire le rumen, aussi appelé panse) des ruminants (bovins et moutons), où les aliments sont digérés en l'absence d'oxygène, et dans les installations de stockage du fumier où la forte teneur en eau de celui-ci empêche la pénétration de l'oxygène.

Dans le monde, les productions animales constituent la principale source de CH_4 atmosphérique attribuable aux activités humaines; quelque 1,3 milliard de têtes de bovins sont à l'origine de 21 % de la totalité des émissions anthropiques de CH_4. Au Canada, le CH_4 produit par les ruminants est de loin la source la plus importante; cette production représente environ huit fois les quantités de CH_4 dégagées par le fumier. On appelle *méthane entérique* le CH_4 produit par les ruminants. La première partie du présent chapitre est consacrée au CH_4 *entérique*, la seconde traite du CH_4 provenant du fumier.

Le méthane produit par les ruminants d'élevage

Productions bovines au Canada

Les 16 millions de bovins du Canada représentent à peu près 1,4 % de la population bovine mondiale. La plus grande partie des bovins du Canada, et plus particulièrement des bovins de boucherie, se trouve en Alberta et en Saskatchewan; quant aux bovins laitiers, on en fait l'élevage surtout au Québec et en Ontario. Diverses influences régionales expliquent cette distribution et la manière dont sont conduits les élevages au Canada; bon nombre de ces influences sont liées aux ressources et à l'histoire de l'industrie.

Les vastes étendues de prairie et de forêt-parc de l'Ouest canadien font de bons pâturages, et les bovins y passent une grande partie de l'année. L'abondance de l'orge-grain fourragère dans ces régions permet aussi aux producteurs de bœuf de conduire leurs élevages en parcs d'engraissement, une pratique plus répandue en Alberta qu'en Saskatchewan ou au Manitoba.

Production bouchère et production laitière

Au Canada, le cycle de la production du bœuf de boucherie comprend trois composantes : dans la composante *naissage-élevage*, les veaux naissent à la fin de l'hiver ou au début du printemps et sont gardés au pâturage tout l'été pour être sevrés à la fin de l'automne. Durant la *semi-finition*, les veaux mâles et les génisses non destinées au remplacement (femelles qui ne seront pas gardées) passent du pâturage au parc d'engraissement où on leur donne une ration à forte composante fourragère pendant une période pouvant durer jusqu'à 100 jours. Finalement, c'est la période de finition : en l'espace de deux à quatre semaines, les bovins passent à une ration riche en grain. On leur donne cette ration lorsqu'ils atteignent environ 380 kg et, à partir de ce moment, leur poids augmente d'environ 1,4 kg par jour; au bout de 130 jours, ils sont abattus. Dans certaines exploitations, la période de pré-finition se prolonge tout l'hiver, et les animaux retournent au pâturage au printemps suivant. Généralement, ces *bovins de long engraissement* sont mis sur le marché après une courte période de finition de moins de 80 jours, à la fin de l'automne ou au début de l'hiver.

Habituellement, les producteurs laissent les vaches laitières en lactation (production de lait) à peu près 305 jours, puis la production de lait s'arrête (tarissement) environ 60 jours. Dans un troupeau laitier, un peu moins de la moitié des animaux ne produisent pas de lait; il s'agit notamment des vaches taries et des génisses de remplacement. (Les jeunes femelles commencent à produire du lait vers l'âge de 24 à 28 mois, après avoir vêlé.)

Durant la lactation, les vaches laitières ont besoin d'une ration à forte teneur énergétique qui se compose de 40–60 % de fourrage et qui est enrichie de grain, de sources de protéines, de minéraux et de vitamines. La consommation de nourriture d'un bovin laitier est généralement supérieure à celle d'un bovin de boucherie, la vache laitière ayant besoin d'une grande quantité d'énergie pour produire du lait (généralement 30-35 litres de lait par jour en moyenne). Au Canada, à la différence de ce qui se fait ailleurs dans le monde, les vaches laitières ne passent pas de longues périodes en pâturage et sont plutôt gardées dans des étables ouvertes ou fermées.

En gardant les vaches laitières dans une étable et les bovins de boucherie, dans des parcs d'engraissement, on peut contrôler leur alimentation très précisément, et il est alors possible de modifier les rations de façon à réduire la production de CH_4. Dans les systèmes avec pâturage par contre, il y a beaucoup moins de possibilités d'ajuster l'alimentation des animaux; essentiellement, la principale stratégie du producteur est alors de gérer ses pâturages de façon à favoriser une production fourragère abondante et de qualité.

Production de méthane entérique chez le bovin

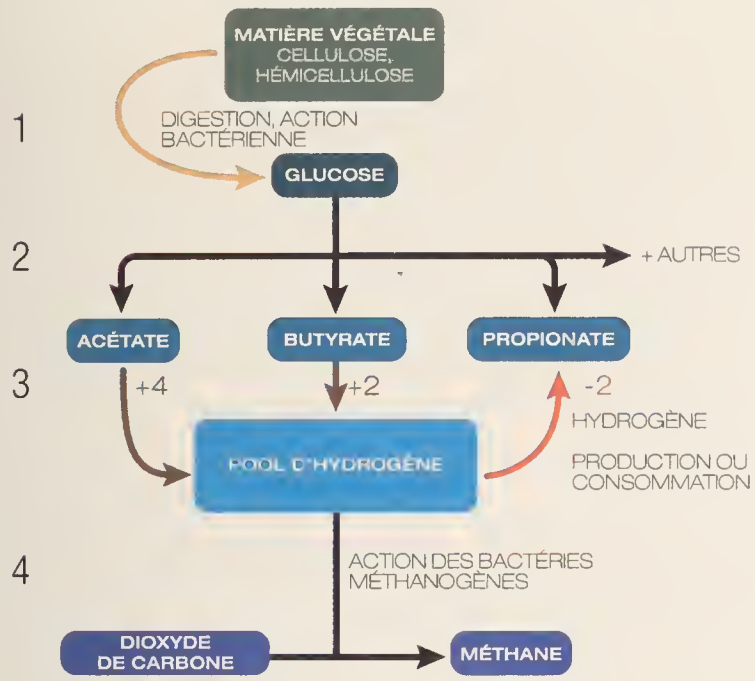
Les bovins étant des ruminants, ils peuvent digérer les fourrages, lesquels se composent essentiellement de cellulose et d'hémicellulose. Même si une alimentation constituée uniquement de fourrage peut combler tous les besoins des bovins, dans certaines exploitations on leur donne aussi des grains, lesquels renferment de l'amidon.

Pour que les glucides soient convertis en énergie assimilable, des bactéries présentes dans le rumen décomposent les matières végétales en acides gras volatils (AGV). Chez le bovin, les AGV sont la principale source d'énergie; les plus abondants sont l'acétate, le propionate et le butyrate. Les proportions d'AGV produites dépendent de la composition de la ration que reçoit l'animal. Par exemple, par comparaison à une ration composée uniquement de fourrages ou ne comprenant qu'une faible proportion de grain, une ration comportant 90 % de grain donne une proportion plus élevée d'acétate et une proportion de propionate moindre. Ce phénomène est loin d'être négligeable, car les AGV jouent un rôle déterminant dans la production d'hydrogène dans le rumen; or, l'hydrogène est un élément important dans la production du CH_4 entérique. Lorsqu'il y a formation d'acétate, la quantité d'hydrogène produite est le double de la quantité générée par la formation du butyrate; la formation du propionate, par contre, *nécessite* de l'hydrogène. Or, comme l'accumulation d'hydrogène dans le rumen nuit à la fonction des bactéries et, par conséquent, à la digestion des glucides, il est utile de faire en sorte qu'il ne s'accumule pas d'hydrogène dans le rumen.

Par ailleurs, un groupe de bactéries dites méthanogènes (c'est-à-dire produisant du CH_4) joue un rôle dans la conversion de l'hydrogène et du CO_2 en CH_4 et en eau dans le rumen. Par conséquent, si on limite la quantité d'hydrogène assimilable par les bactéries méthanogènes dans le rumen, on limite la formation de CH_4 entérique. Pour ce faire, on peut entre autres influer sur le processus de fermentation pour favoriser la production de propionate ou de butyrate, aux dépens de la formation d'acétate, ce qui réduit la quantité d'hydrogène assimilable par les bactéries méthanogènes pour la formation de CH_4 entérique.

FIGURE 17

LA PRODUCTION DU CH_4 DANS LE RUMEN



Les bovins peuvent digérer les fourrages, constitués de cellulose et d'hémicellulose, pour combler leurs besoins en énergie d'entretien, ainsi que pour leur croissance et la production de lait. Dans le rumen (estomac), la digestion de ces substances donne du glucose (1) et d'autres sucres simples qui sont convertis en acides gras volatils (2) de divers types. Lorsqu'on augmente la proportion de propionate produite dans le rumen (3) en modifiant la ration, on réduit la quantité d'hydrogène que peuvent assimiler les bactéries méthanogènes (4) pour produire du CH_4. La production de propionate est un moyen de réduire les émissions de CH_4.

La plus grande partie du CH_4 entérique que produisent les bovins est produite dans le rumen par le processus que nous venons de décrire. Toutefois, l'intestin de l'animal peut aussi être le siège d'un processus de fermentation. Dans l'une des études qui ont été réalisées sur la production de CH_4 dans le rumen et dans l'intestin, on a constaté que 13 % du CH_4 est produit dans l'intestin, mais qu'environ 89 % passe dans le sang par la paroi intestinale. De même, quelque 95 % du CH_4 produit dans le rumen passe dans la circulation sanguine. Le CH_4 qui se retrouve dans le sang est acheminé jusqu'aux poumons d'où il est expiré durant la respiration de l'animal. Ainsi, 99 % du CH_4 rejeté est émis par les narines et la bouche de l'animal, seulement 1 % des émissions totales de CH_4 étant expulsées par le rectum.

Réduction des émissions de méthane entérique

Plusieurs approches valables s'offrent pour réduire les émissions de CH_4 des bovins de boucherie et des bovins laitiers. L'une d'elles consiste à réduire la quantité de CH_4 produite par unité d'énergie alimentaire consommée en modifiant la ration des animaux ainsi que d'autres éléments de la conduite de l'élevage. Une autre méthode permet de réduire la production de méthane entérique en élevant

des animaux qui transforment leur ration plus efficacement : on peut ainsi réduire les émissions produites par unité de viande ou de lait, ce qui permet d'élever moins d'animaux pour obtenir une même quantité de produit.

À proprement parler toutefois, l'augmentation de la productivité des animaux ne donne pas lieu à une baisse des émissions de CH_4, à moins que la production totale soit fixe. Un exemple de ceci est un système de gestion des approvisionnements où la production totale de la denrée est limitée, un peu comme la production laitière est gérée dans le secteur laitier canadien. On donne au tableau 5 un aperçu de ce genre de pratiques et la réduction des émissions de CH_4 qu'elles sont censées produire. Les éléments du tableau 5 sont repris en détail dans les pages qui suivent.

Méthode 1 : Réduction des émissions de CH_4 par la gestion des rations et d'autres éléments de la conduite de l'élevage

Utilisation de rations à forte teneur en grain pour limiter la production de CH_4

Lorsqu'on donne à des ruminants une ration à forte teneur en grain, c'est-à-dire une ration dans laquelle plus de 90 % de la matière sèche est composée de grain, on réduit la proportion de l'énergie alimentaire convertie en CH_4 dans le rumen de l'animal. Toutefois, lorsqu'on donne du grain à des bovins, c'est-à-dire un aliment qui aurait pu être consommé par des humains, on n'exploite pas la capacité unique des ruminants, soit celle de convertir la cellulose, impropre à la consommation humaine en lait et en viande, des sources de protéines de grande qualité.

Une ration à forte teneur en grain influe sur la fermentation qui s'opère dans le rumen de l'animal : la proportion d'acétate produite diminue, alors que la proportion de propionate augmente. Rappelons que la formation d'acétate dans le rumen favorise la production de CH_4, tandis que le propionate est associé à la baisse de la production de CH_4. Il est également possible que l'acidité du milieu ruminal ait un important effet réducteur sur la production de CH_4 entérique. Les acides résultant de la fermentation pourraient abaisser le pH dans le rumen jusqu'à un niveau où la croissance des bactéries méthanogènes est inhibée.

Quoiqu'il en soit, si la consommation accrue de grain réduit les émissions de CH_4, il ne faut pas oublier que la production du grain donne lieu à une augmentation de la production et du transport d'engrais chimiques azotés. Or, l'utilisation accrue d'engrais chimiques se traduit par l'augmentation des émissions de N_2O (libéré par les engrais) et de CO_2, libéré par les combustibles fossiles nécessaires à la production et au transport des engrais. Il reste à déterminer si, en bout de ligne, l'utilisation de rations à teneur en grain accrue se traduit par une baisse ou une réduction des émissions totales de gaz à effet de serre (GES) dans le secteur des productions animales.

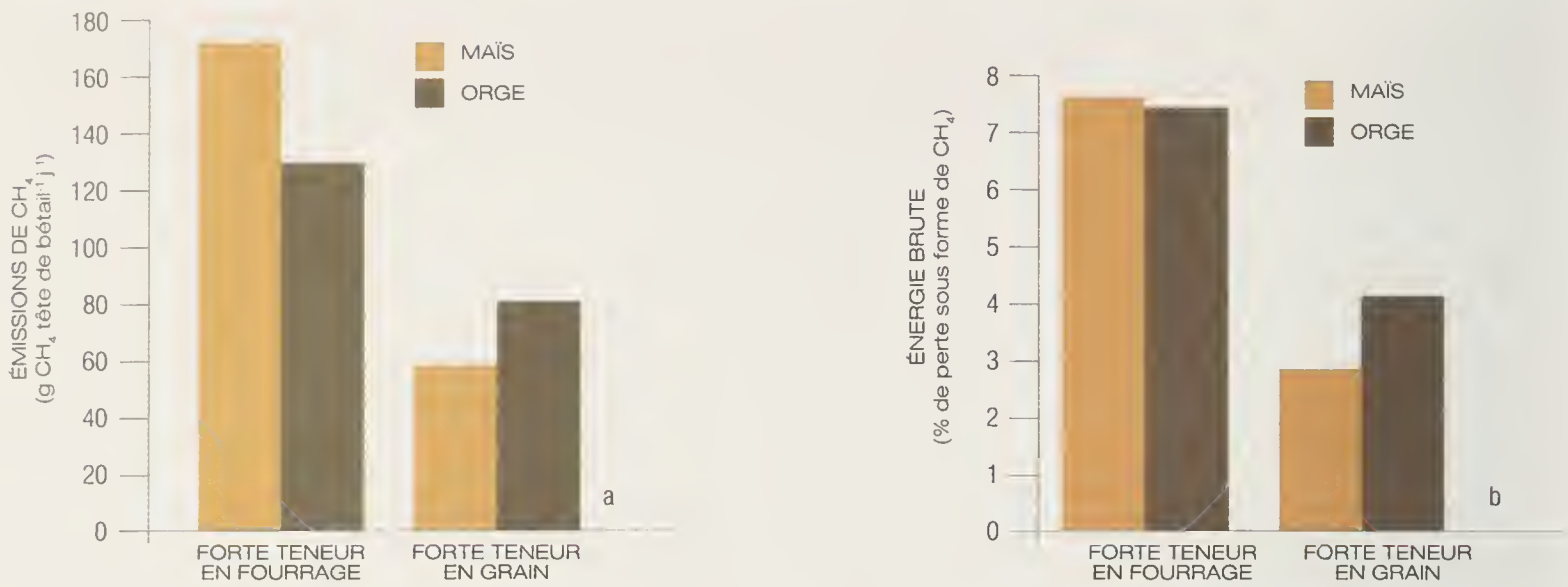
TABLEAU 5

Pratiques possibles pour réduire les émissions de CH_4

MÉTHODE	RÉDUCTION DE CH_4 (%)	COMMENTAIRE
Réduction des émissions de CH_4 par unité d'énergie alimentaire fournie par la ration et diverses autres options		
Ration à forte teneur en grain	10-100	Degré de certitude élevé
Composition de grain	5-10	Degré de certitude élevé
Gras et graines oléagineuses	5-25	Degré de certitude élevé
Ionophores	0-15	Effet passager dépendant de la concentration utilisée
Qualité du fourrage et du pâturage	5-25	Degré de certitude moyen
Espèces fourragères	10-25	Degré de certitude moyen
Tannins condensés	0-15	Effet dépendant de la source et de la concentration
Précurseurs du propionate	0-75	Effet dépendant de la dose
Levure	0-5	Effet dépendant de la souche
Vaccin anti-méthane	Inconnue	Expérimental
Sélection génétique favorisant la réduction de la production de méthane	Inconnue	Théorique
Réduction des émissions de CH_4 par unité de produit grâce à l'utilisation d'animaux à meilleur indice de conversion		
Sélection génétique visant à en améliorer l'indice de conversion	5-25	Expérimental
Modification de la ration en vue d'améliorer le gain pondéral ou la production de lait	10	Degré de certitude élevé
Prolongation de la lactation des vaches laitières pour réduire le nombre de remplacements	10	Expérimental
Gestion de l'ensemble du cycle des bovins de boucherie	10-20	Degré de certitude élevé
Performance de reproduction améliorée	Inconnue	Expérimental
Sélection génétique visant l'augmentation de la productivité	10-20	Degré de certitude élevé

Source : S. McGinn, AAC, Lethbridge (Alberta)

Exemple de l'impact de l'alimentation sur les émissions de CH_4



Les émissions sont exprimées en grammes de CH_4 par tête de bétail par jour (a), et en pourcentage d'énergie alimentaire dissipée sous forme de CH_4 (b). Il est plus précis de calculer la quantité de CH_4 libérée par un animal d'après le pourcentage d'énergie alimentaire dissipée sous forme de CH_4 parce qu'ainsi on prend en compte la ration utilisée pour réduire les émissions de CH_4.

Source : Beauchemin et McGinn (2005)

Composition des grains – les grains ne sont pas tous les mêmes!

Comme on peut le voir sur le graphique ci-dessus, la réduction des émissions de CH_4 qu'une ration à forte teneur en grain peut entraîner dépend du type de grain utilisé. Les réductions obtenues avec le maïs sont plus importantes que celles obtenues avec l'orge. Les émissions de méthane des bovins en parc d'engraissement qui reçoivent une ration de semi-finition composée à 70 % de fourrages ont baissé de 38 % avec une ration de finition à base d'orge, et de 64 % avec une ration de finition à base de maïs. La différence pourrait s'expliquer par le déplacement partiel de la digestion du rumen à l'intestin, la digestion du maïs dans le rumen étant généralement moins complète que celle de l'orge. Par surcroît, l'orge renferme plus de cellulose et d'hémicellulose que le maïs; or, ces glucides structuraux fermentent plus lentement que les amidons et les sucres, de sorte qu'il se forme plus d'acétate et moins de propionate.

Gras et oléagineux

Au point de vue de la réduction des émissions de CH_4, l'ajout de gras à la ration des animaux offre d'intéressantes possibilités; c'est aussi une stratégie logique, car, dans les productions commerciales d'aliments pour ruminants, on utilise déjà des gras comme des huiles, des graines oléagineuses ou des gras d'origine animale pour augmenter la densité énergétique de la matière sèche et réduire la fermentation nécessaire pour exploiter l'énergie de la ration. L'ajout de gras à la ration réduit les émissions de CH_4, essentiellement par inhibition de la croissance des protozoaires du rumen; or, comme de nombreuses bactéries méthanogènes sont physiquement associées à des protozoaires, le fait de réduire les populations de protozoaires entraîne la baisse des effectifs méthanogènes. En outre, les gras

ajoutés à la ration remplacent des glucides qui auraient été digérés dans le rumen et auraient contribué à la production de CH_4. Certains lipides sont riches en acides gras insaturés (essentiellement les gras d'origine végétale); or, la transformation ou *biohydrogénation* des acides gras qui se produit dans le rumen est un processus qui nécessite de l'hydrogène.

Comme on peut le voir au tableau 6, des travaux ont été menés sur l'effet que l'ajout de gras aux rations à base de fourrage produit sur les émissions de CH_4. Toutes les sources de gras ajoutées dans une proportion comblant de 3,3 à 5,3 % de l'apport énergétique des animaux ont réduit les émissions de CH_4. Les sources d'acides gras à longue chaîne insaturés (huile et graines de tournesol, huile de canola) étaient les plus efficaces, avec 21–27 % de la consommation de CH_4 par unité d'énergie brute. Le suif, source de gras saturés, était un peu moins efficace, la réduction étant de 17 %. (Les acides gras à longue chaîne réduisent la production de CH_4 entérique de façon inversement proportionnelle à leur degré de saturation. Les acides gras à chaîne moyenne sont aussi efficaces, mais ils proviennent de sources, comme l'huile de coco et l'huile de canola génétiquement modifié, dont le coût est souvent prohibitif pour les producteurs.)

TABLEAU 6

Impact de l'ajout de gras aux rations à forte teneur en fourrage (75 %, matière sèche) des bovins en croissance

SOURCE	PROPORTION DE GRAS AJOUTÉE (% DE L'APPORT EN MS)	APPORT EN MS	DIGESTIBILITÉ DE LA MS DANS LE TRACTUS DIGESTIF	MÉTHANE (% DE L'APPORT D'EB)
	Différence, en pourcentage, par rapport à la ration témoin sans gras ajouté			
Huile de tournesol	3,3	-1,4	0,7	-21,3[a]
	5,3	-1,5	-6,1	-21,5[a]
Graines de tournesol	3,3	-10,5[a]	-6,6[a]	-26,7[a]
Huile de canola	4,6	-9,9[a]	-14,7[a]	-20,6
Suif	3,3	-4,1	-1,2	-17,1[a]

a = diffère du témoin ($P < 0,15$)

MS = matière sèche; EB = énergie brute

Sources : Résultats de trois études faites au Centre de recherche à Lethbridge par S. McGinn et K. Beauchemin.

L'ajout de gras à la ration des animaux se traduit par la réduction des émissions de CH_4, mais peut aussi donner lieu à une baisse de la consommation de nourriture et de la digestibilité des fibres. L'effet net peut être la diminution de la consommation totale d'énergie digestible malgré l'augmentation de la *densité* énergétique de la ration. C'est ce qui est arrivé dans une étude où l'on a ajouté à la ration des animaux étudiés de fortes proportions de graines de tournesol, de canola ou de suif. Puisque les acides gras à longue chaîne inhibent les bactéries qui digèrent les fibres dans le rumen, la digestion des fibres baisse

inévitablement. L'ajout de gras à la ration peut se traduire par une augmentation de la consommation d'énergie chez les bovins si on atténue les effets nuisibles qui s'exercent sur la consommation de fibres et sur la digestion des fibres ingérées en incorporant à l'alimentation une plus grande proportion de grain ou en limitant la teneur en gras total de la ration à 6–7 % de la matière sèche.

Ionophores

Les ionophores, comme le monensin, sont des antimicrobiens qu'on utilise généralement dans les rations commerciales pour bovins de boucherie et bovins laitiers en vue de moduler la consommation de nourriture des animaux, de combattre la météorisation (ballonnement) et d'améliorer l'indice de consommation. Le monensin abaisse la proportion d'acétate et élève la proportion de propionate dans le rumen, ce qui réduit les émissions de CH_4. Dans certains cas, il peut aussi réduire les populations de protozoaires ruminales. Cet aspect a son importance, car on a constaté une relation directe entre les effectifs des protozoaires dans le rumen et la formation de CH_4. On estime que les protozoaires du rumen constituent l'habitat des bactéries méthanogènes ruminales dans une proportion pouvant atteindre 20 %; par ailleurs, on pense que les bactéries méthanogènes qui vivent sur les protozoaires ou à l'intérieur sont à l'origine d'environ 37 % des émissions de CH_4 provenant des ruminants.

Dans des études portant sur des bovins de boucherie recevant une ration composée à 75 % de fourragères, les émissions de CH_4 ont baissé de 9 % lorsqu'on a ajouté du monensin à l'alimentation des animaux à raison de 33 mg/kg pendant 21 jours. Cette baisse est comprise dans la plage de valeurs (légère à 25 %) dont nous avons fait état plus haut. Dans plusieurs autres études, toutefois, on a constaté que les effets du monensin sur les émissions de CH_4 sont peu durables. Ainsi, certains scientifiques ont constaté que l'effet suppresseur du monensin sur le CH_4 disparaissait de quatre à six semaines après l'ingestion. Étant donné cette faible durabilité ainsi que les pressions croissantes que l'opinion publique exerce pour qu'on abandonne les antimicrobiens comme le monensin dans les productions animales, on peut dire que le monensin n'est probablement pas la solution à long terme pour réduire les émissions de CH_4 entérique au Canada.

Qualité du fourrage et des pâturages

L'amélioration de la qualité du fourrage se traduit généralement par une augmentation de la production quotidienne de CH_4, surtout lorsque les animaux ont libre accès à leur nourriture. Le fourrage de grande qualité restant moins longtemps dans le rumen, l'animal mange davantage, de sorte qu'il se forme plus de substrat fermentable dans le rumen et que, par conséquent, la production quotidienne de CH_4 entérique est accrue. Néanmoins, la quantité de CH_4 produite par unité d'énergie consommée ou par unité de denrée produite augmente généralement lorsque la qualité du fourrage baisse.

Espèces fourragères

Les animaux qui mangent des légumineuses produisent moins de méthane que ceux qui mangent des graminées, mais cette relation dépend aussi de la maturité du fourrage

consommé. Des scientifiques ont déterminé que la production de CH_4 par unité d'énergie digestible devrait baisser de 21 % lorsqu'on utilise du foin de luzerne au lieu de foin de phléole des prés. Les légumineuses produisent moins de CH_4 parce qu'elles renferment une moins grande proportion de glucides structuraux, et, de ce fait, restent moins longtemps dans le rumen. La proportion de propionate dans le rumen s'en trouve augmentée, ce qui signifie qu'il se forme moins de CH_4 entérique.

Tannins condensés

Les tannins sont des composés phénoliques qu'on trouve dans certaines plantes. Dans plusieurs études en laboratoire, on a constaté que l'utilisation de fourrage renfermant des tannins condensés et des extraits de tannin réduit les émissions de CH_4. Ces expériences *in vitro* ont amené des scientifiques de la Nouvelle-Zélande à réaliser une série d'études dans lesquelles ils ont donné des fourrages riches en tannin à des moutons et à des vaches laitières. Dans les fourrages qu'ils ont utilisés, les espèces fourragères classiques, comme le ray-grass anglais, ont été remplacées par des espèces riches en tannin, et les émissions de CH_4 ont diminué. Toutefois, on ignore si la baisse des émissions est un effet direct des tannins ou résulte de l'amélioration de la qualité du fourrage. Il se pourrait que les fourrages riches en tannins condensés empêchent la production de CH_4 en réduisant la digestibilité des fibres un peu comme il arrive lorsqu'on ajoute des gras et des graines oléagineuses dans la ration.

Pour la réduction des émissions de CH_4, l'utilisation des tannins a du potentiel, mais il faudrait approfondir la question pour déterminer la concentration optimale et la source de tannin à utiliser pour éviter des effets qui pourraient nuire à la productivité des animaux. Dans des travaux menés en Europe et en Australie, on a constaté que les tannins font baisser la production de CH_4 lorsqu'ils sont ingérés par certains ruminants (mouton et bovin laitier), mais qu'ils peuvent nuire à la productivité, ce qui rend cette approche douteuse pour l'instant.

Précurseurs du propionate

Le fumarate et le malate sont des acides organiques et jouent le rôle de capteurs d'hydrogène dans le rumen. Ils peuvent réduire les émissions de CH_4 en faisant augmenter la formation de propionate. L'ajout d'acide fumarique dans la ration, dans une proportion pouvant atteindre 2 %, est resté sans effet sur les émissions de CH_4 de bovins. Dans de récents travaux réalisés en Irlande, on a ajouté 3 % de malate à la ration de vaches en lactation : les réductions des émissions de CH_4 ont été très faibles. Au Royaume-Uni, on a utilisé une proportion bien plus importante, et des rations contenant jusqu'à 10 % d'acide fumarique, données à des moutons, ont réduit les émissions de CH_4 de 40–75 %, selon que l'acide fumarique employé était encapsulé dans du gras, ce qui en ralentit la libération dans le rumen. Malheureusement, ces acides organiques sont coûteux, ce qui signifie que les employer en grandes quantités pour réduire les émissions de CH_4 n'est, pour l'instant, ni économique, ni vraiment réalisable.

Levures

Au Canada, on utilise beaucoup la levure *Saccharomyces cerevisiae* dans la ration pour améliorer la fonction ruminale des animaux. Les produits varient selon la souche de *S. cerevisiae* utilisée et selon le nombre et la viabilité des cellules. Des études en laboratoire ont révélé que certaines souches de levures vivantes peuvent stimuler l'assimilation de l'hydrogène chez les bactéries acétogènes du rumen, ce qui favorise la formation d'acétate sans production de CH_4.

Certains produits de levures commerciaux peuvent faire diminuer de 3 % la quantité d'énergie alimentaire convertie en CH_4. La sélection pourrait permettre de mettre au point des souches de levures en favorisant leurs effets anti-méthanogènes. Toutefois, les souches de levures dont on dispose pour l'instant n'ont probablement que des effets mineurs sur la production de CH_4.

Vaccin anti-méthanogène et thérapie aux anticorps

Des scientifiques australiens ont examiné la possibilité de mettre au point un vaccin contre les bactéries méthanogènes et les protozoaires en vue d'abaisser la production de CH_4 ruminal. Au Canada, des scientifiques ont produit des IgY anti-méthanogènes et ont examiné l'impact de ces anticorps sur la production de CH_4 *in vitro*; cette approche a parfois donné des résultats *in vitro*, mais il reste à l'évaluer chez l'animal. Les deux technologies en étant encore au stade purement expérimental, il reste à démontrer si elles offrent un moyen valable d'abaisser la production de CH_4.

Sélection génétique favorisant les animaux qui produisent moins de CH_4

On sait que la production de CH_4 chez l'humain est une caractéristique héréditaire; chez les bovins, rien n'a encore été tenté pour sélectionner des géniteurs en vue de réduire la production de CH_4. Comme la sélection d'animaux en fonction d'une seule caractéristique qui n'est pas liée à la productivité pourrait se traduire par une baisse de rendement, il est peu probable que cette approche soit retenue.

Méthode 2 : Réduction de la production de CH_4 par l'utilisation d'animaux plus productifs ou réduction des émissions par unité de produit

Sélection génétique favorisant les animaux à faible indice de consommation

Comme la production de CH_4 dépend beaucoup de la quantité de nourriture consommée, la réduction de l'indice de consommation, c'est-à-dire de la quantité de nourriture consommée pour produire une unité de viande ou de lait, est un moyen de réduire les émissions. Récemment, des chercheurs du Canada et de l'Australie ont pratiqué une sélection de bovins en fonction de leur consommation résiduelle, ou consommation nette, qui est une mesure de l'indice de consommation. Les bovins à faible consommation résiduelle mangent moins que ce qu'on pourrait prévoir d'après leur poids et leur vitesse de croissance, ce qui signifie que leur indice de consommation est meilleur que celui des bovins à forte consommation résiduelle. Dans une étude récemment réalisée en Australie, on a constaté chez des bovins

ayant un bon indice de consommation que la production de CH_4 par kilogramme de gain pondéral était inférieure dans une proportion de 6,7 % par comparaison à des bovins dont l'indice de consommation était moins bon. Au Canada, dans le cadre d'un programme de sélection comparable, on a constaté que les bovins à faible consommation résiduelle consomment moins de nourriture par kilogramme de gain pondéral, et que, parallèlement, les émissions quotidiennes de CH_4 qui leur sont attribuables sont moindres. Lorsque tous les bovins recevaient la même quantité de nourriture, la production de CH_4 des animaux à faible consommation résiduelle était inférieure dans une proportion de 28 % par comparaison à celle des animaux à forte consommation résiduelle, ce qui permet de supposer que le métabolisme des bovins à faible consommation résiduelle serait plus efficace.

Modification des rations

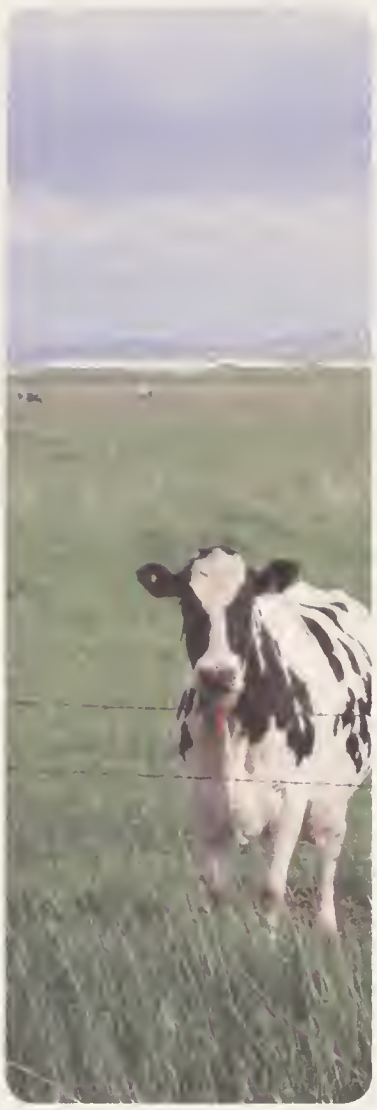
L'amélioration de la ration peut se traduire par une meilleure utilisation des aliments et des nutriments qu'ils renferment et, par conséquent, par une réduction des émissions de CH_4. Pour améliorer les rations, on doit mieux caractériser le profil nutritif des aliments, raffiner les modèles utilisés pour formuler les rations et parfaire nos connaissances sur les besoins nutritifs des bovins.

Prolongation de la période de lactation des vaches laitières

Dans bien des régions du monde, les chercheurs examinent la possibilité de faire vêler les vaches laitières tous les deux ans, plutôt que tous les ans, et de prolonger la lactation sur deux années. On pense que la lactation prolongée ne changerait pas la production totale de lait du troupeau, mais elle aurait pour effet de réduire le nombre de jours pendant lesquels une vache ne produit pas de lait durant sa vie et d'abaisser les coûts de production associés à l'accouplement, au vêlage, au maintien de la bonne santé de l'animal et à son remplacement. La pratique de la lactation prolongée se traduirait aussi par l'amélioration du bien-être des vaches en raison de la réduction du stress métabolique associé au vêlage. Dans de récents travaux réalisés à Victoria, en Australie, on a déterminé qu'une lactation de 400 jours se traduit par une baisse de 10 % du budget total que l'exploitation consacre à l'alimentation des animaux par comparaison à la lactation classique de 305 jours parce qu'on a gardé moins de génisses. (Le nombre de vaches matures à remplacer était moins élevé.)

Gestion des émissions de CH_4 durant toute la vie du bovin de boucherie

Améliorer la productivité des bovins de boucherie signifie les amener plus tôt à un poids acceptable pour l'abattage, ce qui peut avoir un retentissement important au point de vue des émissions de CH_4 qu'ils produisent au cours de leur vie. Les scientifiques ont déterminé qu'en abaissant l'âge des taureaux à l'abattage de 30 à 25 mois, on réduit de 16,5 % les émissions à vie de CH_4, et de 12 % les émissions par kilogramme de carcasse. (Le poids des carcasses passe de 400 à 380 kilogrammes.) Il est également possible de réduire les émissions de CH_4 par unité de produit en augmentant le poids à l'abattage, ce qui revient à une baisse du nombre d'animaux nécessaires pour produire la même quantité de viande.



Amélioration de la performance de la reproduction

L'amélioration de la performance de la reproduction des bovins peut donner lieu à la réduction de la quantité totale de CH_4 produite par troupeau, car le nombre total d'animaux de remplacement nécessaires diminue. Les scientifiques estiment que l'amélioration de la fertilité pourrait permettre de réduire l'ensemble des émissions de CH_4 de 10 %, voire de 24 % dans les régions où la fertilité est particulièrement faible. En Nouvelle-Zélande, la hausse de l'incidence des jumeaux chez les brebis s'est traduite par des baisses appréciables des émissions de CH_4 : on obtient le même nombre d'agneaux avec un nombre moins élevé de brebis. Cette approche est particulièrement intéressante, car elle offre des avantages économiques indéniables en plus de la possible réduction des émissions de gaz à effet de serre.

En pratiquant une sélection qui favorise la productivité, on peut réduire la production de CH_4 entérique, car on utilise moins de nourriture par animal par unité de produit. Toutefois, la productivité accrue, surtout dans le secteur laitier, s'accompagne souvent d'une baisse de fertilité chez les vaches. Or, la baisse de fertilité entraîne l'augmentation des émissions globales de CH_4 de l'exploitation en raison du nombre accru d'animaux de remplacement nécessaires.

Gestion agricole

Les stratégies agricoles visant à réduire les émissions de CH_4 entérique n'abaissent pas seulement les GES dans l'atmosphère, mais sont aussi susceptibles d'accroître dans une mesure significative l'efficacité de la conversion des matières végétales en lait et en viande par les bovins. Une baisse de la production de CH_4 entérique de 20 % au Canada se traduirait par une réduction de 9 % des émissions de GES d'origine agricole, et par une diminution de 0,7 % des émissions totales de GES du Canada. En même temps, cette baisse de 20 % aurait pour effet d'améliorer la compétitivité du secteur des productions animales du Canada en augmentant de 75 grammes par jour le gain pondéral des bovins de boucherie en croissance et de un litre par jour la production de lait des vaches laitières : une aubaine pour les producteurs!

Même si les chercheurs ont constaté qu'il est possible de réduire les émissions de CH_4 en changeant l'alimentation des bovins, la mise en œuvre de stratégies pour réaliser cet objectif n'est pas sans coûts. Il faut approfondir la question pour élaborer des stratégies économiques. Il importe également d'évaluer les stratégies de réduction en prenant en compte la totalité du cycle des productions animales, car une baisse des émissions de gaz à effet de serre à un point du cycle peut donner lieu à des augmentations plus loin dans la chaîne de production.

Lorsqu'on songe aux avantages que présente la réduction des émissions de CH_4 entérique des bovins, une chose est certaine : au point de vue énergétique, la production de viande et de lait en est rendue plus efficace. Bon nombre des stratégies alimentaires décrites sont relativement faciles à mettre en œuvre dans l'exploitation agricole. Certaines permettent également d'abaisser le coût de

production de la viande et du lait. L'instauration de programmes d'échanges de crédits d'émission de carbone encouragera peut-être les producteurs à adopter des stratégies de réduction des émissions qui, pour l'instant, ne sont pas économiquement viables. Il est important aussi de noter qu'en réduisant ses émissions de CH_4, le secteur des productions animales devient une industrie plus respectueuse de l'environnement.

Le méthane des fumiers

La production de fumier au Canada

Au Canada, il y a beaucoup plus d'animaux d'élevage que de personnes. En 2007, les exploitations d'élevage canadiennes comprenaient environ 16 millions de bovins, 15 millions de porcs, 130 millions de volailles et plusieurs millions d'autres animaux. Ces troupeaux produisent des quantités considérables d'excréments : plus de 200 millions de tonnes chaque année, dont environ 70 % sont produits par les bovins de boucherie. Comme on peut le voir à la figure 19, la plus grande partie du fumier est épandue sur les terres agricoles comme engrais. Toutefois, le fumier n'est pas épandu dès qu'il est produit : on l'accumule, dans les étables, en amoncellements à l'extérieur, dans des fosses ou dans des réservoirs. Pendant un certain temps, il est décomposé et digéré par les microorganismes, ce qui entraîne la dégradation du substrat riche en nutriments et la libération de quantités considérables de GES.

La façon dont le fumier est stocké dépend du type d'animal qui l'a produit et de l'utilisation qu'on veut en faire. L'urine et les matières fécales des animaux qui paissent restent dans les pâturages. Dans le cas des porcheries et des grandes exploitations laitières, la tendance est d'utiliser de très petites quantités de litière et d'ajouter les eaux usées de nettoyage et les eaux de la laiterie au fumier, celui-ci étant stocké sous forme liquide, qu'on appelle lisier, dans des réservoirs ou des fosses. Avec la plupart des autres types de production animale, on évite d'ajouter de l'eau aux excréments, et on stocke ceux-ci sous forme solide, qu'on appelle alors fumier. Le fumier renferme habituellement une quantité appréciable de matériaux de litière, soit de la paille, des copeaux de bois, ou d'autres matières organiques servant à garder les animaux au sec et au chaud. Aujourd'hui, certains producteurs compostent leur fumier ou l'ajoutent à des *digesteurs* anaérobies qui produisent de l'énergie en brûlant le CH_4 du fumier. Ces méthodes ne sont pas nouvelles, mais leur emploi se répand, en partie parce qu'elles peuvent parfois contribuer à réduire les émissions de GES et aussi parce qu'elles permettent de produire de l'énergie qui peut être utilisée dans l'exploitation agricole. Avec ce genre de biotechnologies, les populations d'organismes pathogènes et les odeurs sont considérablement réduites dans le fumier, ce qui améliore les conditions de vie des personnes habitant à proximité des exploitations agricoles.

FIGURE 6

LE FUMIER EST UN ÉLÉMENT ESSENTIEL DES SYSTÈMES AGRICOLES MODERNES

Les nutriments qui sont assimilés par les plantes cultivées sont présents dans la ration donnée aux animaux et sont en partie excrétés dans le fumier. Le fumier pose un problème d'élimination à l'agriculteur, mais c'est aussi une ressource en raison des nutriments utiles qu'il contient et qui peuvent servir pour les cultures. Le cycle des nutriments, qui passent de la plante à l'animal, puis, par l'épandage du fumier, qui retournent à la plante, permet aux agriculteurs d'éliminer le fumier tout en ajoutant des nutriments au sol.

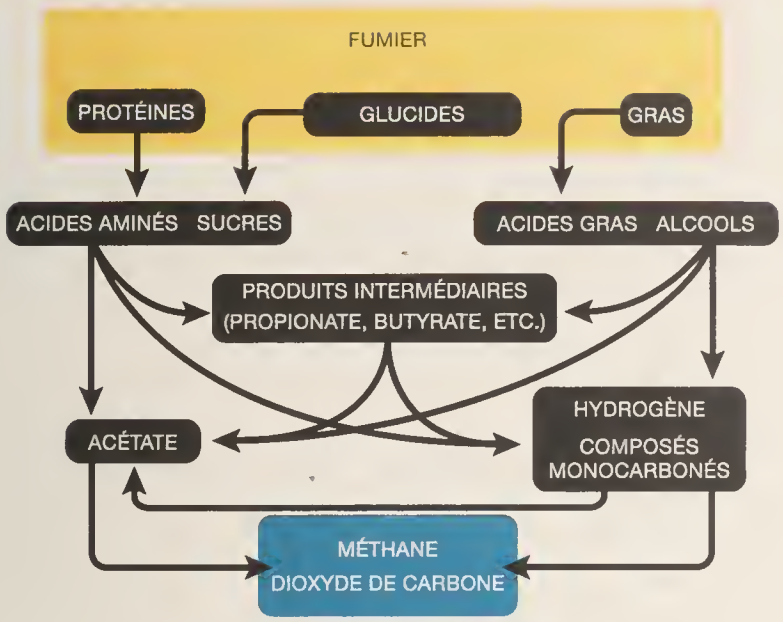
Les fumiers produisent du CH_4 surtout lorsqu'ils sont stockés sous forme de boues liquides ou dans les autres états essentiellement liquides dans lesquels ils peuvent se présenter. Dans le fumier stocké à l'état solide, l'oxygène se diffuse, ce qui réduit la formation de CH_4, car il est oxydé en CO_2 et en H_2O. La quantité de CH_4 produite dépend non seulement de la manière dont le fumier a été manutentionné et stocké, mais aussi du type d'animaux qui l'ont produit et de leur alimentation.

La production de CH_4 par le fumier

Le méthane qui se dégage du fumier est le produit final de la décomposition de matières organiques en conditions anaérobies, c'est-à-dire en l'absence d'oxygène. Les bactéries méthanogènes assimilent les matières organiques pour se développer et libèrent des gaz, dont du CH_4. Le méthane est donc un sous-produit d'activité bactérienne. La transformation de la matière organique en CH_4 est opérée par un ensemble des bactéries de différents types qui exercent leur action en séquence, le processus donnant du CH_4 et du CO_2.

FIGURE 20

La conversion de la matière organique du fumier en CH_4 et CO_2



Le fumier contient des composés organiques comme des protéines, des glucides et des gras. Ces composés sont de dimensions trop grandes pour traverser la membrane cellulaire des bactéries. Les bactéries fermentaires fabriquent des enzymes extracellulaires qui décomposent ces molécules en composés solubles de petites dimensions, comme des acides aminés, des sucres et des acides gras, pouvant traverser la membrane cellulaire par diffusion. Sous l'action de ces bactéries, les sucres et les acides aminés sont transformés en acétate, propionate, butyrate, hydrogène et CO_2. Les bactéries acétogènes productrices d'hydrogène oxydent le propionate et le butyrate, ce qui produit de l'acide acétique, de l'hydrogène et du dioxyde de carbone. Finalement, les bactéries méthanogènes acétoclastes transforment l'acide acétique, produisant du méthane et du dioxyde de carbone, et les bactéries méthanogènes utilisatrices d'hydrogène réduisent le dioxyde de carbone en méthane.

Les composantes du fumier étant de dimensions trop grandes pour traverser la membrane cellulaire des bactéries, elles doivent être réduites par un processus d'hydrolyse à l'extérieur de la cellule bactérienne. L'enzyme qui permet de les décomposer est produite par les bactéries. Les sucres, les alcools et les acides résultant de l'hydrolyse entrent dans une série de réactions qui produisent divers types de molécules, et notamment d'autres types d'acides gras volatils, de l'hydrogène et des composantes organiques simples. À la fin, la réaction donne du CH_4 et du CO_2. L'ensemble du processus peut être subdivisé en six réactions qui s'opèrent en parallèle et en série comme l'illustre la figure 20.

À l'état naturel, le fumier contient déjà toutes les bactéries nécessaires à la production de CH_4. Cependant, la vitesse de production de CH_4 dépend de la densité des populations méthanogènes actives dans le fumier et de leur degré d'activité. Un grand nombre de facteurs peuvent influer sur la densité et l'activité des populations de bactéries méthanogènes, et notamment les suivants :

- Absence d'oxygène—la production du CH_4 exige des conditions anaérobies strictes.
- Température—l'activité des bactéries, et, par conséquent, leur production de CH_4, atteint son maximum à environ 60-65 °C
- Espèce animale
- Qualité de la ration et quantité donnée à l'animal
- Âge et sexe de l'animal
- Méthode de collecte du fumier
- Période de stockage du fumier
- Pratiques de gestion du fumier stocké (p. ex., fréquence de l'enlèvement du fumier, quantité de résidus restant après l'enlèvement du fumier et quantité de matières étrangères [comme la litière de paille ou de sciure de bois] incorporée au fumier)
- Propriétés du fumier (p. ex., acidité [pH]) et présence de composés comme l'ammoniac et les acides gras volatils (AGV) qui, à forte concentration, inhibent le développement des bactéries anaérobies, ce qui réduit les émissions de CH_4.

Étant donné le grand nombre de facteurs environnementaux et de pratiques de gestion susceptibles d'influer sur les émissions de CH_4 des systèmes de gestion des fumiers, il est difficile de comparer la production en fonction de la région, du type de système de gestion du fumier et du type d'animal. Il faut recueillir des données par une surveillance à long terme des émissions de CH_4 des systèmes de stockage des fumiers et par des études en laboratoire où sont reproduites les conditions de stockage pour être en mesure d'évaluer l'impact que chacun des facteurs environnementaux et chacune des pratiques de gestion ont sur les émissions de CH_4.

MESURE DES ÉMISSIONS DE CH_4 DU FUMIER—EXEMPLE : LES EXPLOITATIONS LAITIÈRES DE L'EST DU CANADA

Pour déterminer dans quelle mesure la température de stockage du fumier, la durée du stockage, la composition du fumier et les pratiques de gestion du fumier influent sur les émissions de CH_4 du fumier de bovin laitier, des scientifiques ont étudié deux exploitations types de production laitière commerciale de l'Est du Canada.

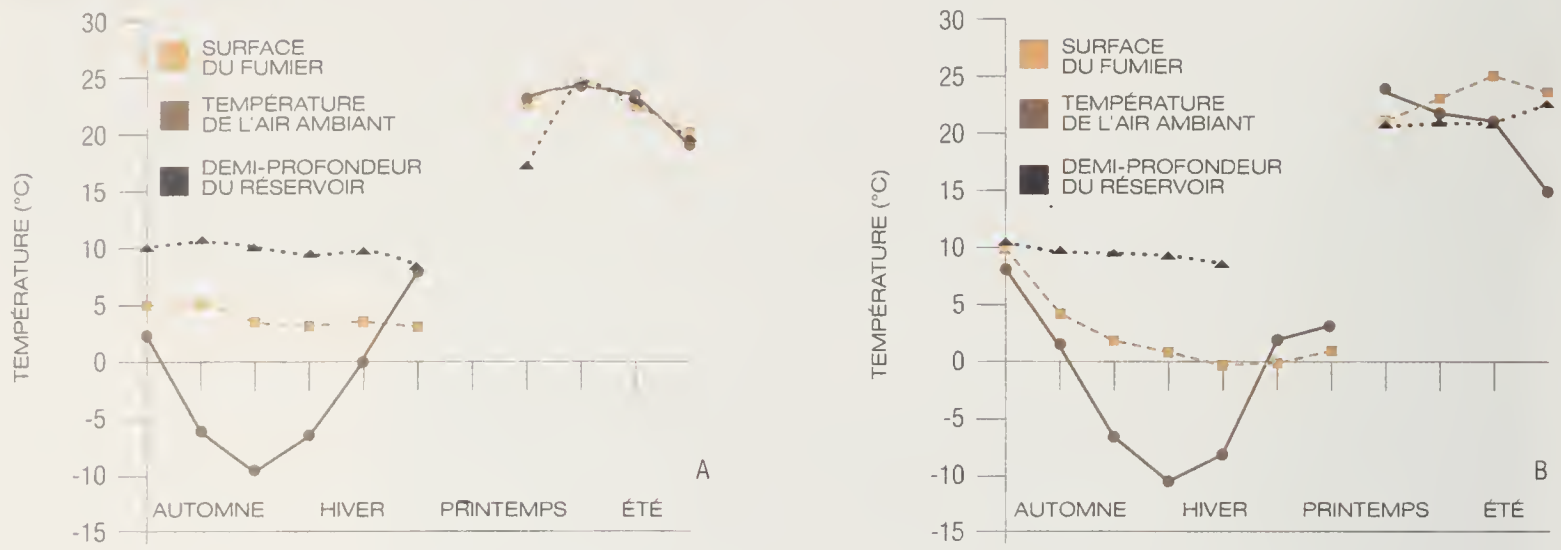
La principale différence entre les deux exploitations (A et B) réside dans la conduite alimentaire des troupeaux. Dans l'exploitation A, les vaches en lactation ont reçu une ration concentrée composée essentiellement de maïs et de luzerne ensilés, de soja, de maïs concassé, d'orge et de suppléments minéraux. Les vaches qui ont reçu cette ration ont produit une grande quantité de lait, soit environ 10 300 kg par année. Les vaches de l'exploitation B ont reçu une ration riche en foin composée de phléole des prés, de luzerne, de maïs concassé et de suppléments alimentaires commerciaux; leur production de lait moyenne était de 8 200 kg par an.

En raison de la conduite alimentaire, le fumier des vaches de l'exploitation A contenait une plus forte concentration de composés organiques solubles, lesquels sont vite dégradés en CH_4. Le potentiel de production de CH_4 du fumier était donc supérieur dans cette exploitation.

L'activité méthanogène augmente en fonction de la température. On a mesuré la température du fumier dans les exploitations A et B pendant un an (les valeurs de température moyenne mensuelle sont données à la figure 21). En automne et en hiver, la température de l'air a baissé à environ -10 °C. Toutefois, l'activité bactérienne dans le fumier a généré de la chaleur, si bien que la température du fumier en surface s'est maintenue au-dessus de 0 °C. Lorsque l'été est arrivé, la température du fumier a monté rapidement dans les deux exploitations pour atteindre une moyenne de 20 °C. La rapidité de l'élévation de la température s'explique essentiellement par la faible épaisseur de la couche de fumier dans les installations de stockage, lesquelles avaient été vidées au printemps. Comme la température du fumier était élevée durant l'été, c'est à cette époque de l'année que le potentiel de production de CH_4 était au maximum.

FIGURE 21

TEMPÉRATURE AMBIANTE ET TEMPÉRATURE DU FUMIER DANS LES EXPLOITATIONS A ET B



En hiver, l'ajout de fumier frais et l'activité bactérienne produisent de la chaleur, si bien que la température du fumier se maintient bien au-dessus de la température de l'air ambiant. Au printemps et en été, le fumier est à peu près à la même température que l'air ambiant. L'élévation de la température correspond au potentiel d'émission maximale de CH_4. Dans cette figure, la température moyenne mensuelle mesurée à la surface du fumier et à mi-profondeur dans les réservoirs de stockage des exploitations A et B est comparée à la température de l'air ambiant.

Source : D. Massé, AAC, Lennoxville (Québec)

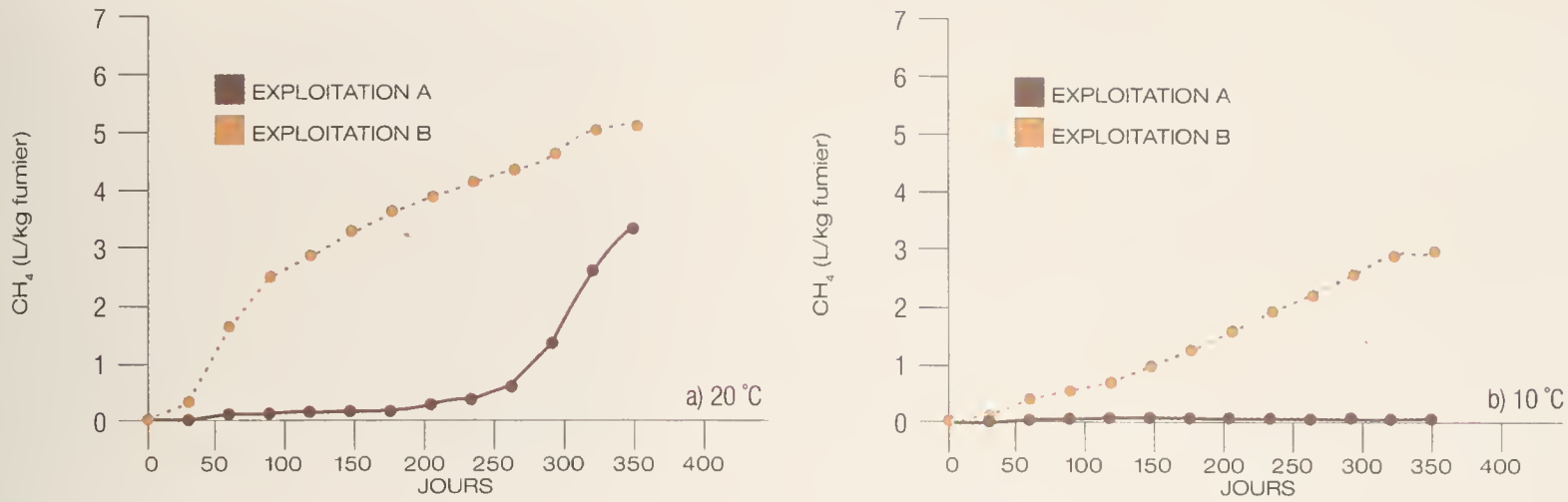
INCIDENCE DE LA DURÉE DU STOCKAGE, DE LA TEMPÉRATURE DU FUMIER ET DES PRATIQUES DE GESTION DU FUMIER SUR LES ÉMISSIONS DE MÉTHANE

Le fumier collecté à l'état de boues liquides dans les exploitations A et B était stocké dans huit installations miniatures de 220 litres. Les contenants étaient placés dans deux cellules à conditions contrôlées : la température était maintenue à 10 °C dans l'une et à 20 °C dans l'autre, ce qui reproduisait les températures saisonnières moyennes des installations commerciales de stockage du fumier. Un tube muni d'un échantillonneur de gaz a été introduit dans l'espace vide, dans le haut de chaque baril. La production de biogaz a été mesurée quotidiennement pendant 350 jours.

À la figure 22, on peut voir la production cumulative de CH_4 pendant la période de stockage de 350 jours dans les deux exploitations, aux deux températures de stockage. La production totale de CH_4 dépendait de la durée du stockage, de la température du fumier et des propriétés du fumier. A 10 °C, aucune activité méthanogène apparente n'a été constatée dans le fumier de l'exploitation A durant toute la période d'étude. À 20 °C, le fumier de l'exploitation A a commencé à produire du méthane après 250 jours environ. Étant donné que, dans les exploitations commerciales, la période qui s'écoule avant que la production de CH_4 ne commence est plus longue que la période de stockage qui précède l'épandage du fumier au champ, les émissions de CH_4 du fumier stocké dans l'exploitation A devraient être relativement faibles.

FIGURE 22

Production cumulative de CH_4 en fonction du temps, de la température et du type de fumier



Source : D. Massé, AAC, Lennoxville (Québec)

Le fumier de l'exploitation B a produit du CH_4 aux deux températures. À 20 °C, l'activité méthanogène a commencé dès le début de la période de stockage et est restée intense pendant 120 jours. À 10 °C, l'activité méthanogène a aussi commencé dès le début de la période de stockage, mais elle était beaucoup moins intense qu'à 20 °C. Le fumier de l'exploitation B a produit plus de CH_4 que celui de l'exploitation A aux deux températures. Parmi les raisons possibles de cet état de choses, signalons les suivantes :

Une quantité considérable de fumier (une couche de plus de 60 cm de hauteur) est restée au fond du contenant de stockage de l'exploitation B après qu'on en ait retiré le fumier pour l'épandre au champ. Le fumier résiduel renfermait d'importantes populations de microorganismes déjà adaptés à la température de stockage et aux propriétés physico-chimiques du fumier. Ces microorganismes ont vite produit du CH_4.

Dans l'exploitation A, la période de 250 jours qui a précédé le début de l'activité méthanogène à 20 °C pourrait s'expliquer par une population d'organismes méthanogènes peu importante dans le fumier ou par la présence de substances inhibitrices comme des agents de nettoyage et de désinfection.

Les composés du fumier comme l'ammoniac et les AGV qui pourraient, à forte concentration, inhiber l'activité méthanogène étaient plus abondants dans le fumier de l'exploitation A que dans le fumier de l'exploitation B. Les scientifiques ont également constaté que la production de CH_4 est plus élevée dans le fumier dilué que dans le fumier concentré.

Réduction des émissions de CH_4 durant le stockage du fumier

Réduction de l'activité méthanogène des bactéries

Il est difficile de stopper complètement les émissions de CH_4 du fumier, mais de nombreuses techniques peuvent être utilisées dans les exploitations agricoles pour les réduire. Comme le CH_4 du fumier est produit par des bactéries, le meilleur moyen de réduire les émissions est de ralentir leur activité. L'une des méthodes possibles consiste à abaisser la température du fumier. En hiver, il faut fréquemment enlever le fumier des bâtiments où sont gardés les animaux pour le déposer dehors où il refroidira rapidement. En été, le stockage du fumier dans des réservoirs aménagés à même le sol contribue à en abaisser la température, ce qui réduit les émissions de CH_4.

On peut aussi réduire l'activité des bactéries méthanogènes en veillant à ce que le fumier ne reste pas longtemps en condition anaérobie. Il faut pour ce faire réduire le temps de stockage du fumier; ainsi, il faut faire des épandages de fumier aussi souvent que possible, par exemple après chaque coupe de foin. Une fois le fumier épandu et suffisamment aéré, les émissions de CH_4 cessent.

Enfin, il faut s'assurer de bien vider les réservoirs de stockage afin qu'il y reste le moins possible de résidus de fumier. Cette précaution peut réduire de façon notable les populations bactériennes adaptées aux conditions particulières du réservoir de stockage et ainsi abaisser la production de CH_4 lorsque du fumier frais y est déposé.

Compostage du fumier

Le compostage du fumier peut réduire à la fois les émissions de CH_4 et les odeurs. Toutefois, certaines méthodes de compostage peuvent nuire à la qualité des eaux et de l'air parce qu'elles donnent lieu à la production de N_2O et d'ammoniac et à la formation de lixiviats renfermant du nitrate. Pour des motifs écologiques et économiques, il est important de choisir la méthode de compostage en visant à limiter autant que possible les pertes azotées.

Utilisation du CH_4

On peut aussi décider de traiter ou d'utiliser le CH_4 une fois qu'il est produit. Par exemple, si l'on couvre un grand réservoir de stockage de fumier d'une membrane souple, le biogaz y sera retenu, de sorte qu'il ne s'échappera pas dans l'atmosphère (figure 23), et on pourra le traiter, par diverses méthodes, pour réduire la concentration de CH_4.

FIGURE 23

Réservoir de stockage couvert d'une membrane

Si l'on couvre un grand réservoir de stockage de fumier d'une membrane souple, le biogaz y sera retenu et on pourra le traiter avant de le laisser se dissiper dans l'atmosphère. Cette installation de stockage de fumier couverte se trouve dans l'Est du Canada.

Références photographiques : D. Massé, AAC, Lennoxville (Québec)

FIGURE 24

Digestion anaérobie du fumier

Le fumier est enlevé de l'étable par pompage et acheminé directement au bioréacteur (1), où il est digéré en condition anaérobie. Le gaz du bioréacteur, surveillé à partir d'une salle des commandes (2) qui permet d'en régulariser le débit, s'écoule jusqu'à une chaudière ou à un générateur électrique (3). Lorsque la chaudière ou le générateur ne sont pas opérationnels, le biogaz est brûlé en torchère (4). Enfin, le fumier traité est gardé dans le réservoir de stockage à long terme qu'on peut voir à l'avant-plan.

Références photographiques : D. Massé, AAC, Lennoxville (Québec)

FIGURE 25

Biofiltration du biogaz

La biofiltration du biogaz émis durant la décomposition du fumier est l'une des méthodes qu'on peut employer pour réduire les émissions de CH_4. On force le passage du gaz à travers le biofiltre où des bactéries se servent du CH_4 comme carburant, le processus donnant du CO_2 et de l'eau comme déchets. Le biofiltre portable illustré ici est installé sur la bouche d'évacuation des gaz d'une installation de stockage couverte de l'Est du Canada.

Références photographiques : D. Massé, AAC, Lennoxville (Québec)

Combustion du biogaz

Le moyen le plus simple reste de brûler, à la torche ou autrement, le biogaz produit par le fumier, ce qui convertit le CH_4 en CO_2, un GES beaucoup moins puissant. Toutefois, si le gaz est torché, l'énergie potentielle du CH_4 est dissipée dans l'air sous forme de chaleur. Pour brûler le CH_4, au lieu d'une torche, on peut utiliser un four pour produire de la chaleur (figure 24) ou alimenter un générateur électrique. La chaleur et l'électricité peuvent toutes deux être utilisées dans l'exploitation agricole. Cette méthode de réduction des GES est plus complexe, mais elle présente le double avantage de réduire les émissions de GES et les coûts de production, car l'exploitant consomme moins de combustible fossile.

Biofiltration

Enfin, il est aussi possible d'éliminer le CH_4 par biofiltration, un processus bactérien naturel par lequel le CH_4 est converti en CO_2 et H_2O. Dans ce processus, le biogaz traverse une substance renfermant des bactéries qui consomment le CH_4 (figure 25) : ces bactéries, au lieu de produire du CH_4 comme déchet l'assimilent pour combler certains de leurs besoins. La biofiltration est utilisée pour éliminer les odeurs et a le potentiel de réduire les émissions de CH_4 dans une proportion pouvant atteindre 80 %.

Nous venons de voir des exemples de pratiques qui pourraient permettre de réduire les émissions de CH_4 du fumier. Dans la plupart des cas, elles n'ont pas seulement pour effet de réduire les émissions de CH_4, elles ont d'autres avantages, comme l'amélioration de la qualité de l'air, en raison de la réduction des odeurs, et la baisse de la consommation de combustibles fossiles, en raison de la production d'énergie verte.

LECTURES COMPLÉMENTAIRES

Beauchemin, K.A. et S.M. McGinn, « Methane emissions from feedlot cattle fed barley or corn diets », *Journal of Animal Science*, 2005, vol. 83, p. 653–661.

Benchaar, C., C. Pomar, J. Chiquette, « Evaluation of dietary strategies to reduce methane production in ruminants: a modelling approach », *Revue canadienne de zootechnie*, vol. 81, p. 563–574.

Kebreab, E. K. Clark, C. Wagner-Riddle et J. France, « Methane and nitrous oxide emissions from animal agriculture: a review », *Revue canadienne de zootechnie*, 2006, vol. 86, p.135-158.

Massé, D.I., Croteau, F., Patni, N.K., Masse, L., « Methane emissions from dairy cow and swine manure slurries stored at 10°C and 15°C », *Le génie des biosystèmes au Canada*, 2003, vol. 45, p. 6.1-6.4

McAllister, T.A., E.K. Okine, G.W. Mathison et K.-J. Cheng, « Dietary, environmental and microbiological aspects of methane production in ruminants », *Revue canadienne de zootechnie*, 1996, vol. 76, p. 231–243.

Les quantités

Mesurer les puits et sources de GES

POURQUOI ET COMMENT LES SCIENTIFIQUES MESURENT-ILS LES ÉCHANGES DE GES?

Les scientifiques doivent mesurer les émissions de gaz à effet de serre (GES) provenant des exploitations agricoles pour déterminer leurs sources ainsi que les quantités produites et trouver de meilleurs moyens de les réduire. Ils doivent mesurer simultanément les concentrations de plusieurs gaz, car les pratiques de gestion qui réduisent les émissions d'un gaz peuvent parfois faire augmenter celles d'un autre gaz. Prenons pour exemple la diminution de l'épandage d'engrais azotés. Si cette mesure réduit les émissions de N_2O, elle finit néanmoins par altérer le rendement de culture et par abaisser la quantité de carbone stockée dans le sol sous forme de matières organiques.

Il n'est toutefois pas facile de mesurer les émissions de GES, puisque les observations varient selon l'endroit où les mesures sont faites et selon les conditions environnementales. L'oxyde nitreux, par exemple, est libéré en panaches sporadiques éparpillés dans les champs. En outre, les émissions fluctuent au cours d'une année; elles peuvent être quasi nulles pendant des semaines ou des mois, pour atteindre soudainement en une seule journée des quantités importantes distribuées de façon irrégulière dans un champ. Ce phénomène survient surtout au moment du dégel printanier dans l'Est canadien, période pendant laquelle on estime que les émissions de N_2O atteignent jusqu'à 40 % des émissions annuelles. Par contre, les rejets nets de CO_2 par la matière organique du sol sont plus graduels – ils sont tellement lents en fait qu'on ne peut souvent les mesurer qu'en évaluant la variation de la teneur du sol en carbone sur de nombreuses années. Les émissions de méthane sont probablement les plus faciles à mesurer. Toutefois, celles qui proviennent du fumier entreposé varient selon la température de l'air, alors que les émissions issues des bovins fluctuent en fonction de leur horaire d'alimentation.

La solution idéale serait de mesurer l'ensemble des émissions de GES d'une ferme, d'un champ ou d'une région. Cette méthode permettrait de les mesurer sur toute l'année et pendant de nombreuses années sans aucunement perturber les cultures ou les animaux dont proviennent les émissions. Malheureusement, cette méthode n'existe pas, et les scientifiques doivent donc se rabattre sur une panoplie de techniques, chacune ayant son utilité mais aussi ses failles. Comme on peut le voir à la figure 26, en ayant recours à plusieurs méthodes, les scientifiques peuvent mesurer les émissions de GES à toutes sortes d'échelles. La combinaison de ces données permet d'élaborer et de vérifier des modèles, qui peuvent à leur tour être utilisés pour obtenir des estimations des émissions à l'échelle d'une ferme, d'un champ ou d'une région.

FIGURE 26

Les principales techniques de mesure

Les chercheurs utilisent toute une panoplie de techniques de mesure pour estimer les émissions de GES provenant du secteur agricole canadien. Chaque technique permet de prendre des mesures sur une période et une superficie données, dont l'ampleur est représentée sur cette figure par la taille des photographies. En combinant les résultats obtenus avec des techniques de mesures qui couvrent différentes périodes et superficies, les scientifiques peuvent estimer les émissions de GES provenant de zones dont la superficie va de moins de un mètre carré jusqu'à plusieurs kilomètres carrés, et ce, sur des périodes allant de quelques minutes à plusieurs années.

Références photographiques : R. Désjardins, E. Pattey, AAC, Ottawa (Ontario) et P.-L. Lizotte, Université McGill, Montréal (Québec)

Quelles que soient les méthodes employées, les données recueillies ne s'appliquent qu'aux lieux et aux moments où les mesures ont été prises. Par exemple, le CH_4 n'est jamais mesuré que dans quelques étables, et le N_2O et le CO_2 que dans quelques champs. Pour calculer les émissions à l'échelle provinciale ou nationale, les scientifiques ont donc recours à des modèles – c'est-à-dire des équations qui décrivent en langage mathématique ce que nous savons sur la production des GES.

Les modèles, présentés de façon plus détaillée ci-après, estiment les quantités de GES produites par une ferme, une région ou un pays à partir de la superficie occupée, du nombre d'animaux qu'on y trouve, du type de gestion des terres adoptée par les producteurs et des conditions particulières des sols et du climat. Les modèles utilisés pour estimer les émissions de GES ont beaucoup changé

au cours des dernières années et continueront d'évoluer au fur et à mesure que les scientifiques en apprendront davantage sur la manière dont les GES sont produits et sur les effets des pratiques agricoles sur les émissions de GES. Ainsi, l'estimation que nous ferons en 2010 des GES émis par les exploitations agricoles en 2007 pourrait être différente de celle que nous en aurons faite en 2008, parce que les nouveaux résultats que nous aurons obtenus grâce à la recherche nous auront permis d'améliorer notre modèle.

Comment les concentrations de GES sont-elles mesurées?

Mesure des échanges de GES à la surface du sol

La façon la plus simple de mesurer les émissions de GES des sols consiste à installer une enceinte fermée (appelée aussi une chambre) sur le sol pour ensuite mesurer de façon répétée la concentration des GES dans l'air emprisonné dans la chambre. Par exemple, si le sol rejette du N_2O, la concentration de ce gaz augmentera graduellement dans la chambre; la rapidité à laquelle le N_2O s'accumulera sera fonction de la quantité de N_2O libérée par le sol. Si le sol absorbe du CH_4, on observera une baisse de la concentration de ce gaz dans la chambre avec le temps.

Cette méthode, la plus populaire encore aujourd'hui, comporte plusieurs avantages : elle est relativement peu coûteuse et peut remplir plusieurs fonctions simultanément. Par exemple, elle peut être utilisée pour comparer la quantité de N_2O émise par des parcelles d'essais situées côte à côte faisant l'objet de différentes pratiques de travail du sol ou d'un épandage de différents types d'engrais. Les chambres ont toutefois leurs inconvénients : elles ne peuvent être utilisées que sur de courtes périodes – une heure tout au plus – elles permettent uniquement de mesurer le N_2O émis par la petite surface qu'elles recouvrent, elles perturbent parfois la surface du sol, ce qui altère les mesures, et elles ne sont pas faciles à utiliser lorsque les champs sont couverts d'eau ou de neige. C'est pourquoi on a mis sur pied de petits réseaux utilisant cette méthode pour la mesure des émissions de GES par les sols. Ils ont permis d'obtenir des données précieuses pour l'élaboration de modèles.

Mesure des échanges de GES à la surface des terres agricoles

Un autre moyen de mesurer les GES consiste à échantillonner l'air au-dessus d'un champ à l'aide de capteurs installés sur des tours (voir la figure 27). Cette technique repose sur le postulat selon lequel si une source émet un gaz, la concentration de ce dernier est plus importante à proximité de la source. La masse d'air ascendante contiendra plus de GES que la masse d'air descendante. En mesurant environ 20 fois par seconde la vitesse verticale du vent et les concentrations de GES en un point surplombant le champ, les scientifiques peuvent calculer la quantité de GES rejetée ou absorbée par le champ. Les émissions de GES peuvent aussi être estimées en faisant la différence entre les concentrations de gaz mesurées en deux points situés à des hauteurs différentes au-dessus d'un champ. Plus le capteur est élevé par rapport au sol, plus la superficie faisant l'objet de la mesure est grande.

Cette technique comporte des avantages importants par rapport à la méthode faisant appel à des chambres : elle permet d'estimer les émissions globales d'une grande surface et d'obtenir des mesures continues sur de longues périodes, même l'hiver et au début du printemps – des périodes cruciales pour les émissions de N_2O. Par contre, cette méthode perd sa fiabilité par temps calme, ce qui est fréquent la nuit. De nombreuses techniques ont été mises au point pour combler ces lacunes et obtenir les données manquantes.

FIGURE 27

MESURES À PARTIR DE TOURS

Les techniques de mesure des concentrations de GES faisant à appel à des instruments installés sur des tours sont de plus en plus courantes. Elles permettent d'obtenir des mesures en continu à l'échelle d'un champ. Dans cette figure, on mesure les émissions de N_2O au dessus d'un champ de blé. La tour située à gauche recueille des échantillons d'air à deux hauteurs différentes. Les échantillons d'air sont envoyés à un analyseur qui mesure la différence entre leur concentration de N_2O. Dans la tour de droite, un anémomètre mesure les vitesses verticale et horizontale du vent. Les émissions de N_2O peuvent être calculées en combinant les mesures de la concentration de N_2O et les mesures de la vitesse du vent.

Références photographiques : E. Pattey, AAC, Ottawa (Ontario)

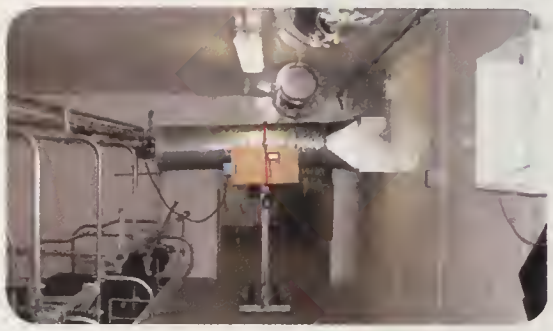
Mesure des émissions de CH_4 et de CO_2 par les bovins

Contrairement aux sols, les animaux ne collaborent pas toujours de façon passive avec ceux qui tentent de mesurer les gaz qu'ils émettent; les scientifiques ont donc dû faire preuve d'imagination pour mettre au point des méthodes novatrices. Ainsi, par exemple, ils utilisent les étables comme s'il s'agissait de chambres géantes. En installant des capteurs dans les conduits d'aération, ils peuvent mesurer la quantité de CH_4 qui pénètre dans une étable et qui en sort pour faire des calculs précis sans perturber les animaux. Comme on peut le voir à la figure 28, ce genre de système a donné de bons résultats dans une étable à vaches laitières au Centre

de recherche et de développement sur le bovin laitier et le porc de Lennoxville au Québec. En prenant des mesures les jours où l'alimentation des vaches ou la façon dont elles sont traitées sont modifiées, les scientifiques peuvent déterminer les effets de ces pratiques sur les émissions de CH_4 et, à partir de ces résultats, recommander des moyens de les réduire.

FIGURE 28

Mesure des émissions de CH_4 dans les étables



Vue de l'extérieur, l'étable à vaches laitières du Centre de recherche et de développement sur le bovin laitier et le porc de Lennoxville au Québec n'a rien de particulier. On trouve toutefois, à l'intérieur, de l'équipement de pointe permettant de mesurer les émissions de CH_4 provenant des animaux. En mesurant les concentrations de CH_4 et la vitesse du vent à l'entrée et à la sortie des conduits d'aération de l'étable, on peut estimer avec précision la quantité de CH_4 émise par les vaches laitières.

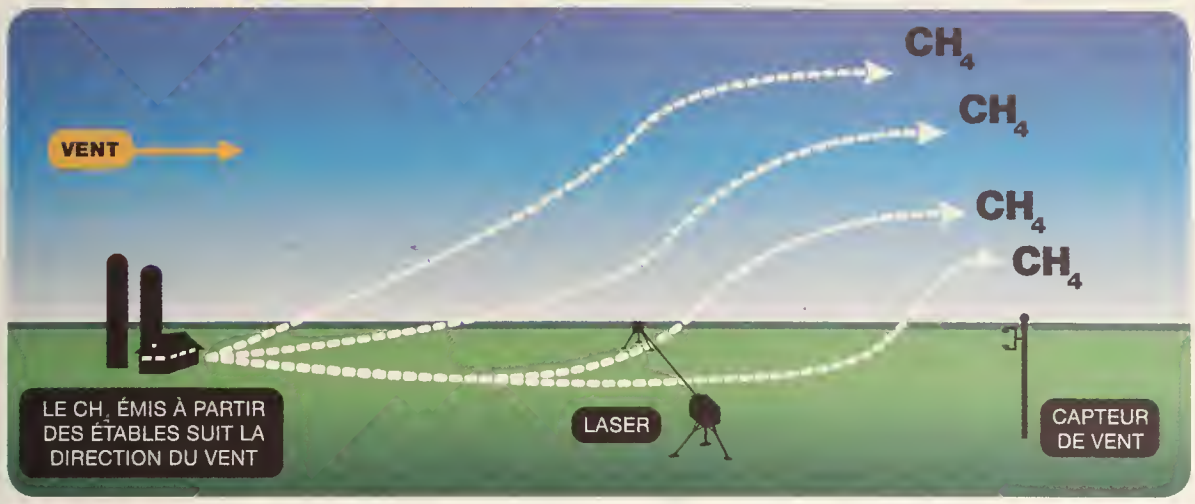
Références photographiques : D. Massé, AAC, Lennoxville (Québec)

Les scientifiques peuvent aussi placer un ou plusieurs animaux dans de petites enceintes – *chambres équipées d'instruments* – pour mesurer très précisément leurs émissions de CH_4. Ils peuvent ainsi évaluer rapidement et avec précision les répercussions de divers types d'aliments ou d'additifs alimentaires. Les animaux doivent cependant être habitués à cet environnement et traités avec soin afin d'éviter qu'ils ne deviennent anxieux, ce qui pourrait fausser les résultats.

Récemment, des chercheurs ont mis au point des méthodes encore plus évoluées pour mesurer les émissions de CH_4. À l'aide d'instruments laser extrêmement sensibles, ils échantillonnent des panaches en aval des sources de CH_4 et calculent la quantité de CH_4 présente. Les capteurs comptent le nombre de molécules de CH_4 traversant un faisceau de rayons laser en aval d'un troupeau, d'une étable ou d'une cuve de stockage de fumier (voir la figure 29). En combinant les mesures de la concentration de CH_4 et les données sur l'écoulement du vent, les chercheurs peuvent estimer les émissions de CH_4 à l'aide d'un modèle informatique. Ils peuvent ainsi déterminer la relation existant entre les émissions de CH_4 et la concentration de ce gaz en n'importe quel point du panache. Cette méthode est idéale pour obtenir des mesures sans aucunement perturber les animaux. Toutefois, comme la plupart des techniques de mesure qui reposent sur la vitesse du vent pour le transport des GES, cette méthode génère des résultats imprécis lorsque le vent est faible.

FIGURE 29

MESURE DE LA CONCENTRATION DE CH_4 DANS LES PANACHES D'AIR



Le méthane émis par les animaux dans une étable est transporté dans l'atmosphère par les vents. En mesurant la concentration du CH_4 à l'aide d'instruments laser, ainsi que l'écoulement du vent, les chercheurs peuvent estimer les émissions de CH_4 d'une ferme.

Mesure des échanges de CO_2

Le dioxyde de carbone est le GES le plus abondant sur la planète et il est surtout rejeté lorsque des combustibles fossiles, tels que l'essence, le diesel et le charbon, sont brûlés. En agriculture, de grandes quantités de CO_2 sont fixées par la photosynthèse pour produire la biomasse. En revanche, une quantité presque équivalente de CO_2 est libérée dans l'atmosphère par la respiration des plantes et des sols. Ainsi, par exemple, le maïs cultivé sur un hectare peut fixer par photosynthèse 30 tonnes de CO_2 par an, mais, une quantité à peu près équivalente de CO_2 est rejetée dans l'atmosphère en raison de la respiration des plantes (sur la ferme et en dehors de celle-ci) et de la décomposition des résidus végétaux et des matières organiques présentes dans le sol.

La détermination de l'échange *net* de CO_2 – c'est-à-dire la différence entre la quantité de CO_2 absorbée et celle qui est émise – n'est pas chose simple et exige des mesures continues sur toute l'année. C'est pourquoi les scientifiques utilisent généralement une approche plus simple : ils commencent par mesurer la quantité de carbone stockée dans le sol; quelques années plus tard, ils prennent une autre mesure au même endroit. Si la quantité a augmenté, c'est que le sol a absorbé plus de CO_2 qu'il n'en a rejeté. Si la quantité a diminué, c'est qu'il en a rejeté plus qu'il n'en a absorbé.

À première vue, de telles mesures semblent simples, mais elles doivent être effectuées avec beaucoup de soin. Les changements de la quantité de carbone dans le sol sont graduels. La quantité de carbone varie peut-être de 0,2 tonne par hectare par année. Or, la teneur du sol en carbone est élevée et peut parfois atteindre 100 tonnes par hectare. Les changements ne deviennent donc mesurables qu'au bout de nombreuses années, voire des décennies. C'est pourquoi les protocoles expérimentaux doivent être élaborés avec soin pour prendre en compte la variabilité de la quantité de carbone dans le sol entre divers emplacements.

On a longtemps cru qu'il était virtuellement impossible d'obtenir 12 mois par année des mesures continues des échanges de GES. Pourtant, il existe maintenant un réseau mondial de tours servant à mesurer le CO_2 qui compte environ 462 sites. Il a permis d'accumuler l'équivalent d'environ 2 750 années de données. Cette excellente base de données est maintenant utilisée pour établir le bilan net du carbone dans la plupart des grands écosystèmes.

Émissions nocturnes de GES à l'échelle d'une exploitation agricole

On a longtemps utilisé des ballons gonflés à l'hélium pour sonder l'atmosphère. Les scientifiques s'en servent maintenant pour mesurer les émissions de GES à l'échelle régionale. La nuit, lorsque la basse atmosphère est stable, les GES de sources agricoles demeurent dans les premiers 50 à 100 mètres de l'atmosphère – la *couche limite nocturne* – qui constituent essentiellement une sorte de chambre d'air fermée au-dessus d'une région. Plusieurs fois par nuit, les scientifiques envoient des capteurs météorologiques et des capteurs de GES installés sur un ballon captif dans cette couche de l'atmosphère. Ils peuvent ainsi calculer la quantité de GES rejetée par les exploitations agricoles pendant la nuit.

Mesure au moyen d'un avion des émissions GES provenant de régions entières

Pour déterminer les émissions de GES de toute une région, les scientifiques ont embarqué des instruments à temps de réponse rapide à bord d'avions. En survolant les terres agricoles à une altitude d'environ 50 mètres et à une vitesse de vol de 180 km/h, l'avion mesure les émissions de GES au-dessus de l'ensemble d'une région en calculant la différence entre la concentration du gaz étudié dans la masse d'air ascendante et dans la masse d'air descendante. Les données recueillies par de tels avions (le Canada dispose d'un de ces appareils) sont particulièrement utiles pour vérifier la précision des modèles de simulation et des prévisions en matière d'émissions de GES, telles que les estimations des inventaires régionaux et nationaux de production de CH_4 et de N_2O. En revanche, comme les avions sont coûteux et qu'ils ne peuvent mesurer les émissions de GES que sur de courtes périodes, ils sont souvent utilisés de concert avec des tours qui mesurent les émissions 24 heures par jour. Grâce à l'avion, la région couverte par une tour (un kilomètre carré) peut être étendue à 100 km^2.

Modèles de simulation pour l'estimation des émissions de GES

Les scientifiques ne pourront jamais recueillir assez de mesures sur une période suffisamment longue pour pouvoir déterminer les émissions de GES de toutes les exploitations agricoles. Ils doivent donc recourir à des équations mathématiques – ou modèles – qui ont été formulées à partir des données dont ils disposent. Les modèles tentent de décrire en langage mathématique la conception qu'ont les scientifiques du monde réel. Étant donné que nous ne comprenons pas

encore parfaitement les phénomènes en cause, tout modèle ne peut être qu'une représentation simpliste du monde réel. Comme le montre la figure 30, si nous voulons nous servir de modèles pour faire des prévisions raisonnables, nous devons utiliser des mesures des flux de GES pour élaborer ces modèles et les vérifier continuellement à la lumière de nos observations.

FIGURE 30

L'ÉLABORATION DE MODÈLES

L'élaboration de modèles des flux de GES se fait parallèlement à la prise de mesures expérimentale. Au départ, les mesures des émissions de GES donnent aux scientifiques les données dont ils ont besoin pour créer un modèle. Lorsqu'ils vérifient ensuite ce modèle à l'aide de données prises dans des conditions qui diffèrent quelque peu de celles qui ont servi à sa conception, ils y découvrent parfois des lacunes. Ce processus peut soulever de nouvelles questions qui deviennent des sujets de recherche. Pour résoudre les failles qui sont ainsi mises en lumière et répondre à ces questions, il faut souvent perfectionner le modèle et prendre d'autres mesures des émissions de GES.

La complexité des modèles utilisés par les scientifiques est extrêmement variable. Certains font appel à de simples opérations arithmétiques. Par exemple, la quantité de N_2O émise par un champ peut être estimée en supposant qu'un certain pourcentage de l'ensemble de l'azote ajouté par l'épandage d'engrais ou de fumier et par les résidus de culture est rejeté sous forme de N_2O. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat a recommandé une valeur de 1,25 %. Toutefois, au Canada, ce pourcentage a été modifié à partir de mesures faites au pays pour prendre en compte des facteurs tels que l'humidité du sol et la topographie. Ainsi, pour estimer les émissions canadiennes, les chercheurs additionnent toutes les quantités d'azote ajoutées à un champ et multiplient ce résultat par une série de coefficients d'émission. Les modèles de ce type, qui reposent simplement sur des observations faites durant de nombreuses années, sont dits *empiriques*.

FIGURE 31

Modèles fondés sur les processus

Lorsqu'on évalue des pratiques de gestion pour déterminer leur efficacité dans la réduction des émissions de GES, il ne faut pas se borner à calculer uniquement les émissions de CO_2 qui en découlent. Deux modèles fondés sur les processus ont été utilisés pour étudier les répercussions de plusieurs changements des pratiques de gestion agricole à l'échelle du Canada sur les émissions de N_2O et de CO_2.

Certains modèles sont extrêmement complexes et mettent en jeu un code machine mis au point grâce à de nombreuses années d'étude. Ces *modèles fondés sur les processus* tentent de décrire chacun des processus qui mènent aux émissions de GES et de déterminer tous les facteurs qui les influencent. La figure 31 montre les résultats obtenus à l'aide de tels modèles pour les conditions canadiennes. L'adoption de certaines pratiques, notamment le semis direct, l'élimination de la jachère et la conversion de terres en prairies permanentes, a permis de réduire les émissions de CO_2 et de N_2O. Par contre, une pratique de gestion qui réduit les émissions de CO_2 peut faire augmenter les émissions nettes de GES en élevant les émissions de N_2O. C'est le cas, par exemple, lorsqu'on utilise une quantité d'azote supérieure à celle recommandée pour fertiliser une culture. Dans une telle situation, illustrée à la figure 31, la séquestration du carbone augmentera, mais la quantité de CO_2 stockée sera inférieure à l'accroissement des émissions de N_2O causé par l'augmentation de la quantité d'engrais appliquée. C'est pourquoi la surfertilisation d'une culture se solde par une élévation des émissions nettes de GES malgré le gain réalisé en carbone séquestré.

À long terme, la plupart des scientifiques visent à utiliser des modèles fondés sur les processus. Par contre, à court terme, ils se servent souvent de modèles empiriques simples, qui exigent moins de données et de connaissances.

L'élaboration de meilleurs modèles demeure un objectif important des scientifiques faisant de la recherche sur les GES. Ces modèles pourraient nous procurer des estimations plus justes des quantités de GES produites, et, fait plus important, nous aider à prévoir quelles pratiques pourraient le mieux contribuer à réduire les émissions. L'élaboration de tels modèles comporte un autre avantage : ils mettent en lumière notre ignorance et les lacunes de nos connaissances sur lesquelles nous devons nous pencher pour parfaire notre compréhension de ces phénomènes.

LECTURES COMPLÉMENTAIRES

Baldocchi, D.D., « Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: Past, present and future », *Global Change Biology*, 2003, vol. 9, p. 479–492.

Desjardins, R.L., J.I. MacPherson et P.H. Schuepp, « Aircraft-based flux sampling strategies », p. 3573-3588 dans R.A. Meyers (éd.), *Encyclopedia of Analytical Chemistry*, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, 2000.

McGinn, S.M., « Measuring greenhouse gas emissions from point sources in agriculture », *Revue canadienne de la science du sol*, 2006, vol. 86, p. 355–371.

Pattey, E., et coll., « Towards standards for measuring greenhouse gas flux from agricultural fields using instrumented towers », *Revue canadienne de la science du sol*, 2006, vol. 86, p. 373–400.

Rochette, P. et G.L. Hutchinson, « Measurement of soil respiration in situ: Chamber techniques », p. 247–286 dans M.K. Viney, (éd.), « Micrometeorology in agricultural systems. ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI», *Agronomy Monograph*, 2005, vol. 47, p. 584.

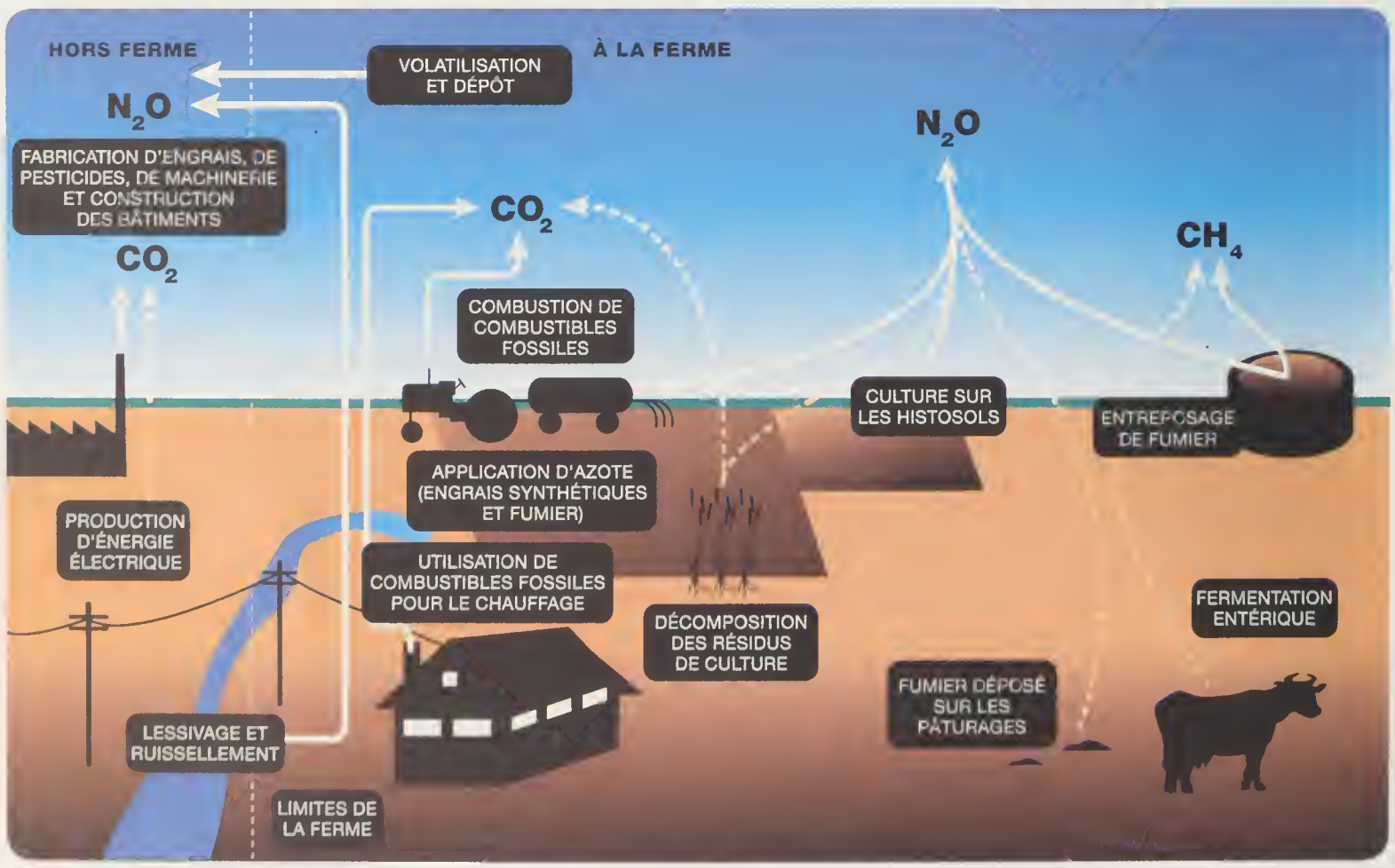
Les quantités
Les émissions agricoles

ESTIMATIONS DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE DU SECTEUR AGRICOLE AU CANADA

Comme on l'explique dans les chapitres précédents, l'agriculture est une importante source de trois GES : CO_2, CH_4 et N_2O. La figure 32 montre que chaque GES a des sources multiples, tant dans les exploitations agricoles qu'à l'extérieur. Dans l'application d'accords internationaux comme le Protocole de Kyoto et la Convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) et pour suivre l'évolution des progrès de la lutte contre le changement climatique, le Canada a choisi de déterminer quantitativement ses émissions de GES de toutes les sources d'une façon transparente et vérifiable et d'en faire rapport chaque année. Le présent chapitre technique donne les estimations d'émissions de GES par le secteur agricole canadien pour la période de 1990 à 2005.

FIGURE 32

SOURCES DES ÉMISSIONS DE GES À LA FERME ET HORS DE LA FERME



Potentiel de réchauffement planétaire

Les gaz à effet de serre n'ont pas tous la même capacité de retenir la chaleur dans l'atmosphère et ne contribuent donc pas dans la même mesure au réchauffement de la planète. Le potentiel de réchauffement planétaire (PRP) nous permet d'évaluer la contribution potentielle d'une masse donnée de GES au réchauffement mondial. Les valeurs les plus récentes sont présentées dans le chapitre d'introduction. Aux fins des rapports prévus par le Protocole de Kyoto, le PRP du N_2O et celui du CH_4 sont considérés 310 et 21 fois plus importants, respectivement, que celui du CO_2 en masse équivalente, sur une période 100 ans. En estimant la contribution de chaque gaz relativement à celle du CO_2 à l'aide du PRP, on peut exprimer les émissions nationales de GES en millions de tonnes d'équivalent de dioxyde de carbone, ou Mt CO_2e. Un Mt de CO_2e est à peu près équivalent aux émissions de CO_2 produites par 220 000 voitures de taille moyenne parcourant une distance de 20 000 km.

Il existe de nombreuses sources de GES d'origine agricole à la ferme et hors de la ferme. Les émissions de N_2O provenant directement des exploitations agricoles sont accrues par l'apport d'azote dans le milieu. C'est ce qui se produit lorsque des engrais synthétiques et du fumier sont appliqués sur les terres, lorsque le fumier est entreposé, lorsqu'il est déposé sur les pâturages par le bétail et lorsque les sols riches en matières organiques (histosols) sont cultivés. Les émissions de N_2O hors ferme surviennent lorsque de l'azote est transporté à l'extérieur de l'exploitation avant d'avoir été converti en N_2O. On trouve cet azote dans l'eau où il est entraîné par le lessivage et le ruissellement ainsi que dans l'air où il aboutit par volatilisation. Le méthane est émis à la ferme lors de la décomposition des matières organiques par des bactéries méthanogènes en l'absence d'oxygène. C'est ce qui se produit pendant le processus digestif des ruminants et pendant l'entreposage du fumier. Le dioxyde de carbone est émis à la ferme par la décomposition des résidus de culture et d'autres matières organiques ainsi que par l'utilisation de combustibles fossiles pour propulser les machines agricoles et pour chauffer les bâtiments de ferme. Les émissions de CO_2 hors ferme proviennent de l'utilisation de combustibles fossiles pour fabriquer des biens nécessaires aux activités agricoles : engrais, pesticides, machines, matériaux de construction des bâtiments et énergie électrique.

Méthode de calcul

La méthode utilisée pour calculer les émissions de GES provenant du secteur agricole canadien varie selon notre degré de connaissance de chaque gaz. Les émissions de CO_2 par les sols sont calculées en intégrant les résultats obtenus à l'aide d'un modèle fondé sur les processus pour estimer l'échange net de CO_2 entre le système plantes-sol et l'atmosphère. Quant aux émissions de CH_4 et de N_2O, comme nous ne disposons d'aucun modèle adéquat fondé sur les processus, elles sont calculées à l'aide de modèles empiriques élaborés par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat et adaptés aux conditions canadiennes. Ces méthodes de calcul offrent la souplesse nécessaire pour pouvoir y intégrer des données spécifiques aux conditions canadiennes et des résultats issus de la recherche, tout en permettant la comparaison avec les inventaires des émissions de GES d'autres pays.

Équation 1 : émissions de CO_2 des sols

Les changements en matière d'affectation ou de gestion des terres ont un effet sur la teneur du sol en carbone qui peut demeurer constante, augmenter ou diminuer. Si l'utilisation et la gestion des terres ne changent pas et que les conditions climatiques demeurent relativement similaires d'années en années, les stocks de carbone du sol finissent par atteindre un état d'équilibre au bout de nombreuses années.

L'équation fondamentale utilisée pour estimer une variation du carbone organique dans le sol (COS) découlant d'un changement d'affectation des terres (CAT) est la suivante :

$$\Delta C = F \times A$$

où :

ΔC = fluctuation des stocks de carbone du sol, en t C an^{-1}

F = fluctuation annuelle moyenne du COS soumis à un CAT, en t C ha^{-1} an^{-1}

A = superficie de changement d'affectation des terres, en hectares (ha)

Comme on peut le voir à la figure 33, les données sur les pratiques d'affectation – A dans l'équation 1 – correspondent sur le plan spatial aux frontières du Cadre écologique national pour le Canada, une stratification écologique hiérarchisée de toutes les terres du pays. La stratification écologique permet systématiquement de mettre les données dont on dispose sur les sols des plus petites unités de superficie à l'échelle nationale et à celle de régions plus vastes liées écologiquement (c.-à-d., des écodistricts, des écorégions ou des écozones). Les plus petites unités de superficie pour lesquelles nous avons estimé une variation du carbone organique dans le sol agricole sont les polygones des Pédo-paysages du Canada (PPC). Au Canada, on dénombre 3 264 polygones des PPC où se déroulent des activités agricoles. Les données sur ces activités à l'échelle nationale proviennent principalement du Recensement de l'agriculture, qui est publié par Statistique Canada pour toutes les fermes, tous les cinq ans.

À l'échelle canadienne et internationale, il existe une abondante documentation traitant des effets des pratiques de gestion agricole sur les stocks de carbone dans les terres agricoles cultivées. Pour prendre en compte ces pratiques dans l'inventaire des GES, on doit posséder une bonne connaissance des variations prévues des stocks de carbone dans le sol et de la superficie des terres touchées par des changements d'affectation. Les changements d'affectation des terres (CAT) qui ont été retenus sont la réduction de l'intensité du travail du sol, la réduction des superficies sous jachère et l'abandon des cultures annuelles au profit des cultures vivaces. Il s'agit des trois principales stratégies mises en œuvre au Canada entre 1990-2005.

FIGURE 33

STRATIFICATION ÉCOLOGIQUE HIÉRARCHISÉE DE TOUTES LES TERRES CANADIENNES

Le territoire du Canada a été divisé en petites unités spatiales – appelées pédo-paysages du Canada – homogènes au chapitre des conditions pédologiques et climatiques. En regroupant des estimations faites à l'échelle de ces petites unités, les scientifiques peuvent estimer les émissions à des échelles beaucoup plus vastes, provinciale ou nationale par exemple.

Pour estimer la variation annuelle moyenne des stocks de carbone dans le sol attribuable aux CAT (F), on a utilisé un modèle des interactions entre les matières organiques du sol et les plantes, le modèle CENTURY, qui permet de simuler la dynamique du carbone dans les terres agricoles canadiennes. Ce modèle a été abondamment utilisé pour simuler le COS et il a été vérifié et validé pour les conditions canadiennes. Les coefficients de carbone (C) issus des modélisations ont été estimés à partir de la différence dans les stocks du carbone du sol avec le temps entre une simulation de *base* d'une affectation généralisée des terres (excluant les changements de pratiques spécifiques) et un scénario d'affectation, dans lequel tous les paramètres sont constants par rapport à la simulation de base, à l'exception du CAT d'intérêt.

Émissions de dioxyde de carbone provenant de l'utilisation de combustibles fossiles

De nombreuses activités, tant à la ferme que hors de la ferme, requièrent l'utilisation de combustibles fossiles et entraînent des rejets de CO_2 et de quantités traces de CH_4 et de N_2O. Une grande proportion de ces émissions provient directement du travail aux champs et indirectement de la production d'électricité, de l'utilisation de combustibles pour le chauffage et de la fabrication des engrais, des pesticides et de la machinerie. Ces émissions occupent une place très importante dans la gestion des émissions de GES. Toutefois, dans les rapports présentés aux termes de la CCNUCC et du Protocole de Kyoto, elles sont prises en compte dans les secteurs du transport et de l'industrie manufacturière et ne sont donc pas incluses dans l'inventaire des GES du secteur agricole.

Équation 2 : émissions de N_2O

On calcule les émissions d'oxyde nitreux des sols et des systèmes de gestion du fumier pour chaque source d'azote (N) en multipliant la quantité d'azote ajoutée provenant de diverses sources (p. ex., engrais synthétiques, résidus de culture, fumier, etc.) par le coefficient d'émission attribué à cette source.

Émissions de $N_2O = N \times CE$

où :

Émissions de N_2O = émissions provenant de diverses sources d'azote, en kg N_2O-N an^{-1}

N = quantité d'azote par source, en kg N

CE = coefficient d'émission, en kg N_2O-N kg N^{-1} an^{-1} pour une source donnée

Au Canada, le coefficient d'émission de N_2O des sols est surtout fonction des conditions d'humidité du sol. Comme on peut le voir à la figure 34(a), dans un climat plus sec, comme celui des Prairies, le coefficient d'émission est beaucoup plus faible que celui qui est utilisé dans l'Est canadien, où le climat est généralement plus humide. En Colombie-Britannique, le coefficient d'émission est modéré dans les zones côtières humides, mais faible dans les régions intérieures où le climat est plus sec. Le coefficient d'émission du N_2O dépend également de la texture du sol, de l'intensité du travail du sol et de la topographie, ainsi que de l'augmentation de l'humidité du sol attribuable au dégel printanier et à l'irrigation des cultures. Un coefficient a été établi pour chaque polygone de PPC selon les conditions climatiques.

Les émissions d'oxyde nitreux provenant du fumier dépendent du système d'entreposage du fumier. Les conditions aérobies ont tendance à accroître les émissions de N_2O, par rapport à celles de CH_4. En conséquence, comme on peut le voir à la figure 34(b), les émissions de N_2O sont plus élevées pour le fumier de pâturages ou le fumier solide entreposé que pour le fumier liquide.

Équation 3 : émissions de CH_4

Les émissions de méthane provenant de la fermentation entérique sont calculées en multipliant la population animale de chaque catégorie par le coefficient d'émission qui se rattache à cette catégorie en particulier.

Émissions de $CH_4 = n \times CE$

où :

Émissions de CH_4 = émissions d'une catégorie animale, en kg CH_4 an^{-1}

n = population de la catégorie animale

CE = coefficient d'émission, kg CH_4 $animal^{-1}$ an^{-1} pour la catégorie animale

Comme on peut le voir à la figure 34(c), les coefficients d'émission varient beaucoup d'une catégorie animale à une autre. Ils fluctuent aussi en fonction de l'alimentation et du degré d'activité de l'animal. Vous trouverez plus de renseignements sur le sujet dans le chapitre sur les émissions de méthane.

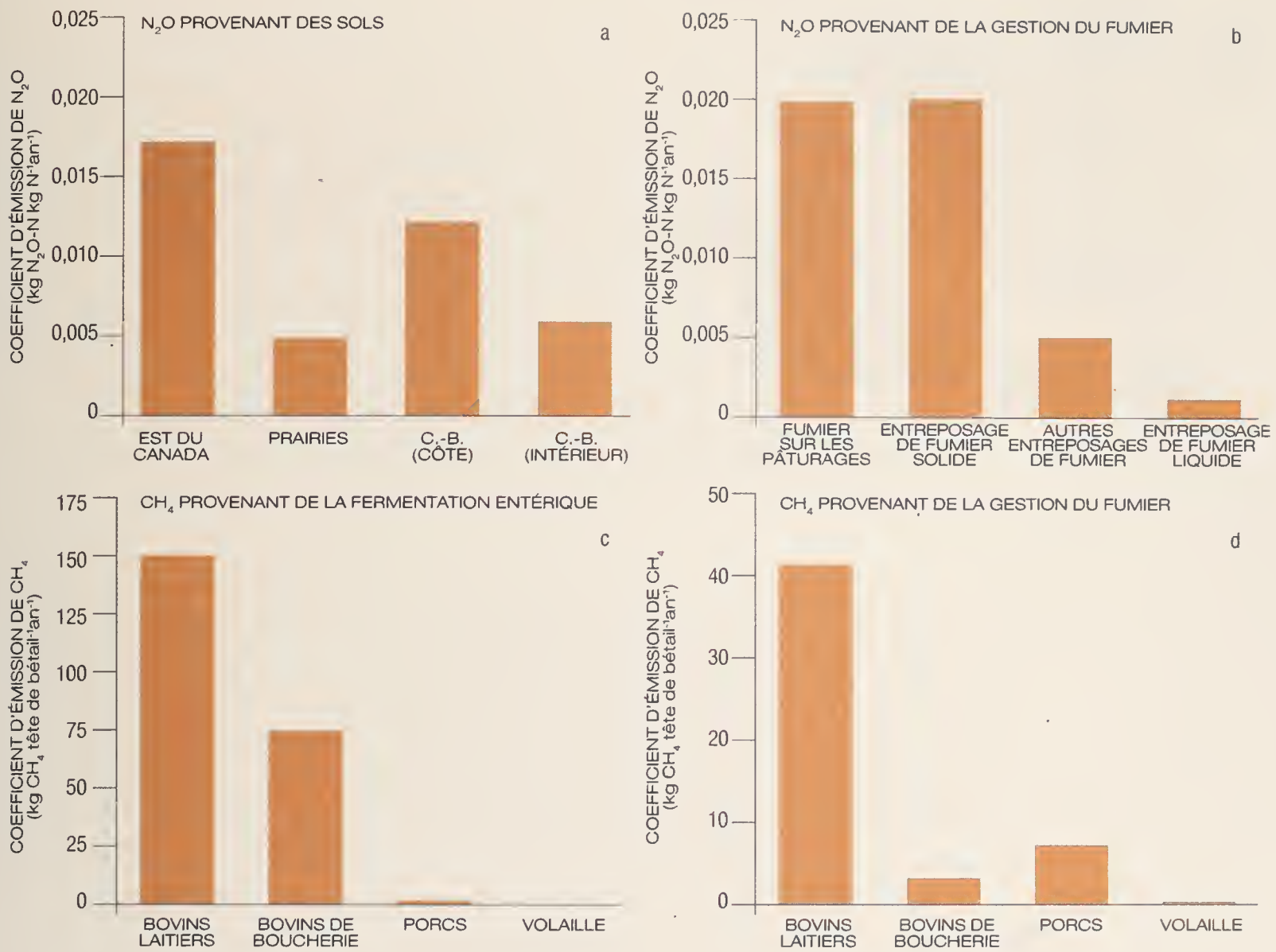
Les émissions associées à la gestion du fumier sont estimées de façon similaire : population animale × coefficient d'émission. Comme on peut le voir à la figure 34(d), le coefficient d'émission le plus élevé est celui qui est attribué aux vaches laitières. Il dépend du système d'entreposage du fumier (p. ex., l'entreposage du fumier liquide produit plus d'émissions que l'entreposage du fumier solide), de la quantité de fumier produite par animal et de la température à laquelle est entreposé le fumier. Le chapitre sur les émissions de méthane donne plus de détails sur le sujet.

Estimations des émissions de GES du secteur agricole au Canada (de 1990 à 2005)

La CCNUCC prescrit que les émissions de GES soient calculées chaque année à partir de 1990. Pour ce qui est des accords internationaux, la plupart des secteurs sont largement intéressés à savoir en quoi les émissions actuelles se comparent à celles de 1990. De 1990 à 2005, les émissions de GES du Canada, tous secteurs confondus, ont progressé de 25 %. Comme le montre la figure 35, l'agriculture est la source d'environ 8 % des émissions nationales de GES si les émissions dues aux combustibles fossiles ne sont pas comptabilisées et 10 % si elles le sont. Entre-temps, l'agriculture augmente ses émissions de N_2O et de CH_4 à un rythme pratiquement semblable à celui de tous les autres secteurs, et ces gaz continuent à représenter les plus importants GES émis par le secteur agricole (figure 36).

FIGURE 34

Coefficients d'émission des GES au Canada



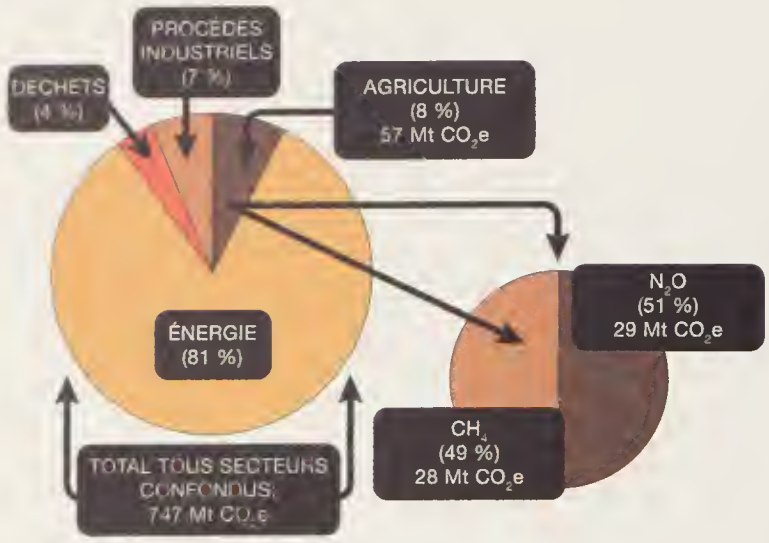
Lorsque l'humidité est élevée, les émissions de N_2O provenant du sol augmentent. En conséquence, les émissions de N_2O par unité de surface sont plus importantes dans les sols humides des provinces de l'Est que dans les sols arides des provinces des Prairies. En Colombie-Britannique, en revanche, les émissions sont variables, car on y trouve des sols humides sur la côte ouest, mais des conditions sèches dans la région intérieure de la province (graphique a). Les émissions d'oxyde nitreux provenant du fumier s'élèvent lorsque ce dernier se décompose dans des conditions aérobies. Les émissions sont donc plus importantes lorsque le fumier est entreposé sous forme solide ou qu'il est déposé sur les pâturages par le bétail que lorsqu'il est entreposé sous forme liquide (graphique b).

Les taux d'émission des GES varient énormément selon les catégories d'animaux et les régions du pays. Par exemple, une vache laitière produit, par fermentation entérique, environ 150 kg de CH_4 par année, alors qu'une vache de boucherie, qui est presque aussi grosse qu'une vache laitière, n'en produit que 70 kg par année (graphique c). Les émissions de méthane provenant de la gestion du fumier fluctuent en fonction du type d'entreposage choisi. Dans les exploitations laitières et porcines, on entrepose surtout le fumier sous forme liquide, ce qui favorise les émissions de CH_4, alors que dans l'industrie du bœuf, on entrepose plutôt le fumier sous forme solide, ce qui limite les émissions de CH_4 (graphique d).

Source : R. Desjardins et D. Worth, ACC, Ottawa (Ontario)

FIGURE 35

Émissions de GES de tous les secteurs et du secteur agricole au Canada en 2005



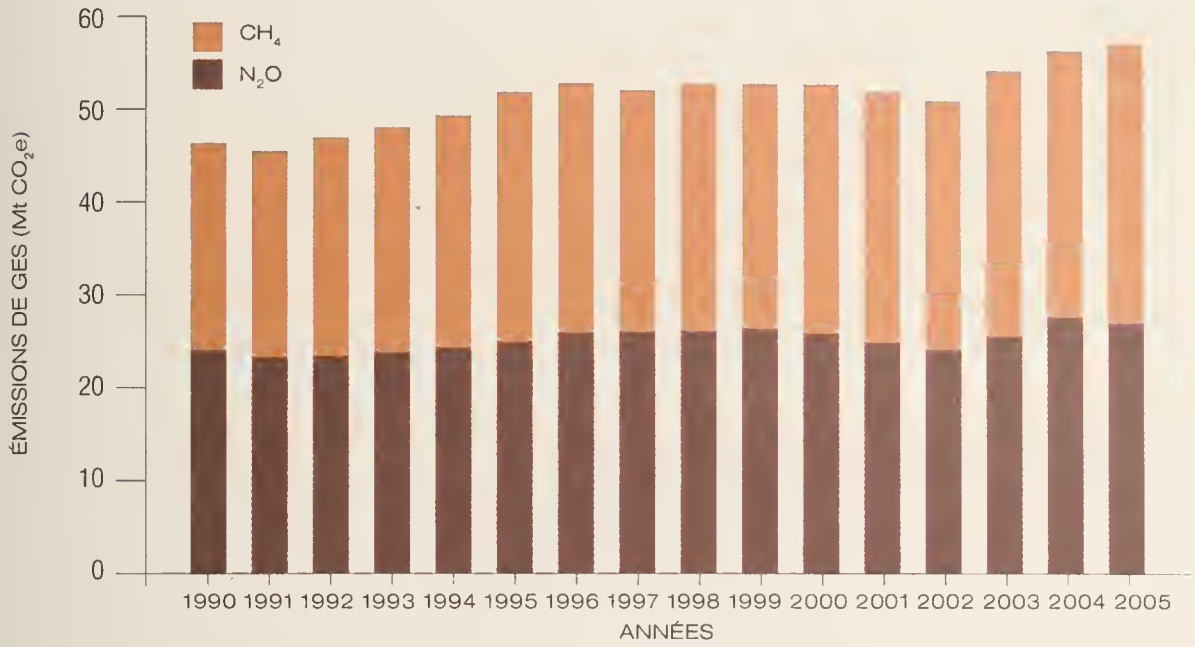
En 2005, le Canada a émis 747 Mt CO_2e. Au total, 81 % de ces émissions étaient imputables au secteur de la production d'énergie. L'agriculture pour sa part était responsable d'une proportion plus faible, bien qu'importante, des émissions de GES à l'échelle nationale : soit environ 8 % ou 57 Mt CO_2e. Les émissions issues du secteur agricole canadien se répartissent presque également entre le N_2O et le CH_4. Quant à celles qui sont associées à la consommation de combustibles fossiles dans le secteur agricole, elles représentaient un autre 2 % des émissions nationales, mais elles sont attribuées aux secteurs du transport et de l'industrie manufacturière.

Source : R. Desjardins et D. Worth, ACC, Ottawa (Ontario)

Les émissions et les absorptions de dioxyde de carbone par les sols sont prises en compte dans la catégorie de source *Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie* de la CCNUCC. Les catégories concernant l'agriculture comprennent celles des prairies converties en terres cultivées, des terres cultivées dont la vocation n'a pas changé, des forêts converties en terres cultivées et des prairies dont la vocation n'a pas changé. Comme on peut le voir à la figure 37, depuis 1990, les prairies converties en terres cultivées ont été une *source* de CO_2 relativement peu importante qui est en décroissance, les terres cultivées restant terres cultivées sont devenues un *puits* de CO_2 relativement grand et en augmentation, et les forêts converties en terres cultivées ont été une *source* de CO_2 relativement importante mais en régression. Le Canada a choisi de définir les prairies comme des pâturages naturels – c'est-à-dire des pâturages non bonifiés dans des régions où ils ne retourneraient pas à l'état de forêts s'ils n'étaient pas aménagés. Compte tenu de cette définition, on a estimé que les prairies dont la vocation n'avait pas changé n'étaient ni une source ni un puits de CO_2. Le résultat net indique que ces catégories, qui étaient une source de 14 Mt CO_2e en 1990, ont atteint un bilan pratiquement neutre en 2005.

FIGURE 36

Émissions de N_2O et de CH_4 du secteur agricole au Canada, (1990–2005)

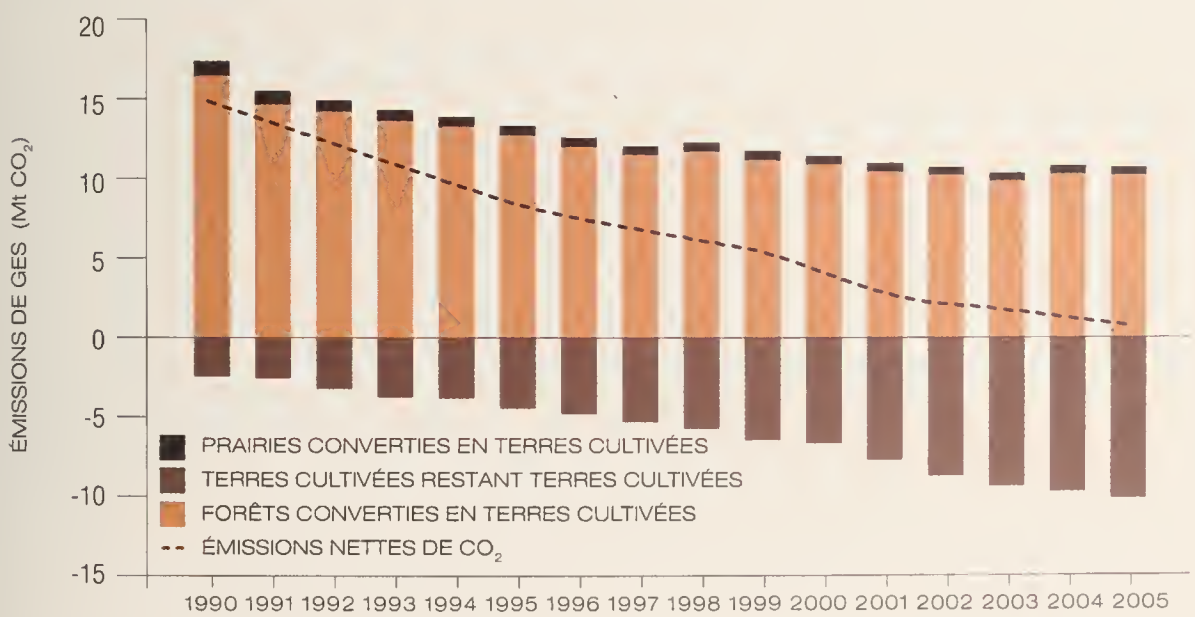


Les émissions d'oxyde nitreux provenant du secteur agricole canadien ont grimpé de 4 Mt CO_2e (ou 14 %) entre 1990 et 2005, et celles de CH_4 ont crû de 7 Mt CO_2e (ou 24 %).

Source : R. Desjardins et D. Worth, ACC, Ottawa (Ontario)

FIGURE 37

Émissions de dioxyde de carbone du secteur agricole liées à l'utilisation des terres, au changement d'affectation des terres et à la foresterie



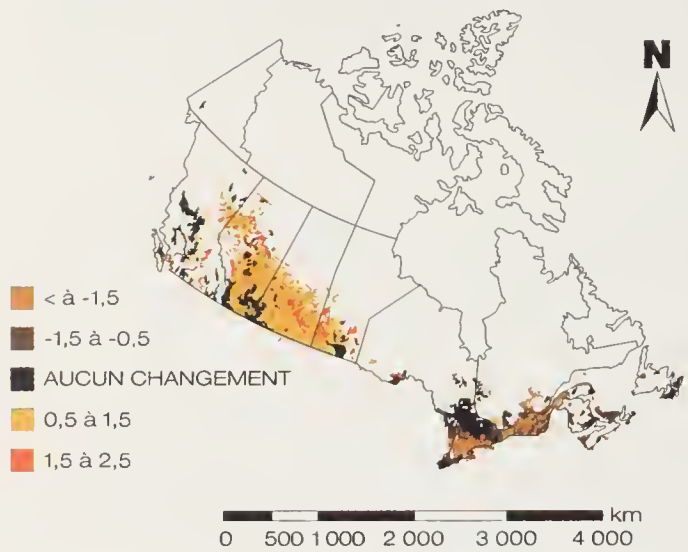
Les émissions nettes de CO_2 d'origine agricole associées au secteur « utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie » ont diminué de presque 14 Mt entre 1990 et 2005. Ce résultat est attribuable à une augmentation de la séquestration du carbone dans les terres cultivées et à une réduction des émissions de CO_2 causées par la conversion de forêts en terres cultivées.

Source : B. McConkey, ACC, Swift Current (Saskatchewan)

La figure 38 montre la variation nette des stocks de carbone dans le sol entre 1990 et 2005 à une profondeur de 30 cm dans les terres agricoles canadiennes appartenant à la catégorie « terres cultivées dont la vocation n'a pas changé ». On peut constater un gain substantiel de carbone dans le sol, en particulier dans les provinces des Prairies, après l'adoption de pratiques de gestion bénéfiques (PGB) comme la réduction des jachères ainsi que l'augmentation des pratiques conservatrices de travail du sol et des cultures vivaces.

FIGURE 38

Changement de la teneur en carbone organique des sols agricoles au Canada (1990–2005), t ha^{-1}



Les producteurs agricoles peuvent changer la quantité de carbone organique dans les sols en adoptant des pratiques de gestion bénéfiques, telles que la réduction du travail du sol, la diminution des superficies en jachère et la conversion de cultures annuelles en cultures vivaces. Au Canada, l'adoption à grande échelle de telles pratiques a entraîné l'augmentation du carbone organique dans le sol dans les terres cultivées des provinces des Prairies. Toutefois, dans de nombreuses régions de l'Est du Canada, on a constaté une réduction du carbone organique dans le sol des terres cultivées parce que des cultures vivaces ont été remplacées par des cultures annuelles, telles que le maïs et le soya. Cette conversion entraîne une hausse des émissions de CO_2, et ce, malgré l'adoption de pratiques de gestion bénéfiques. On peut voir sur la carte la variation du stock de carbone organique dans les premiers 30 cm du sol entre 1990 et 2005 pour toutes les terres agricoles du Canada.

Source B. McConkey, ACC, Swift Current (Saskatchewan)

Pourquoi les émissions de GES ont-elles fluctué?

Comme on peut le voir à la figure 36, les émissions de CH_4 et de N_2O du secteur agricole ont crû de 19 % depuis 1990. Toutefois, si on inclut les émissions de CO_2 attribuables à l'utilisation des sols agricoles dans la comparaison, on constate que les émissions totales nettes de GES du secteur agricole diminuent de 6 %. Ce phénomène s'explique par une importante diminution des émissions nettes de CO_2 par les sols imputable à l'adoption croissante de pratiques agricoles bénéfiques. En effet, la diminution des jachères dans les provinces des Prairies, l'augmentation des pratiques conservatrices de travail du sol – travail du sol réduisant au minimum la perturbation du sol – et le recours accru à des cultures vivaces dans les provinces des Prairies ont entraîné une hausse des stocks de carbone dans les sols.

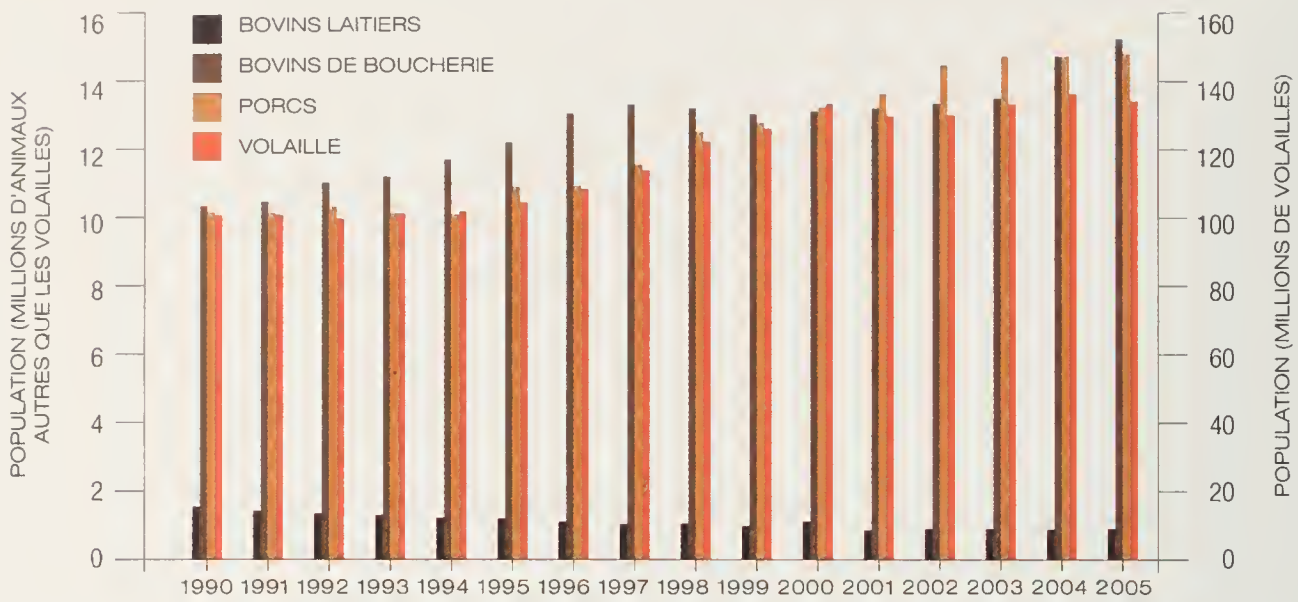
Les pratiques agricoles bénéfiques se traduisent souvent par des retombées économiques et environnementales. Ainsi, la superficie des terres cultivées sans labour ou avec un travail minimal du sol est passée de 30 % des terres cultivées au Canada en 1990, à 70 % en 2005. Vous trouverez dans le chapitre sur le carbone un exposé approfondi sur les pratiques agricoles bénéfiques.

Bien que le carbone organique du sol continue d'augmenter dans les terres agricoles des provinces des Prairies, il faut souligner que les changements en matière de pratiques agricoles peuvent aussi entraîner une hausse des *émissions* de CO_2 provenant des stocks de carbone du sol. C'est ce qui s'est produit dans l'Est canadien, en particulier en Ontario et au Québec, où la superficie des cultures fourragères vivaces a été réduite au profit de cultures de plantes annuelles, comme le maïs et le soya. En fait, certaines régions de ces deux provinces sont une *source* de CO_2 équivalente au *puits* que constituent certaines parties des provinces des Prairies. Autre fait important, si on abandonnait les pratiques agricoles bénéfiques mentionnées ci-dessus, le carbone stocké serait restitué à l'atmosphère, et ce peut-être même à une vitesse plus rapide que celle à laquelle il a été séquestré. Si des changements intervenaient au chapitre de l'économie ou des politiques gouvernementales ou encore si le climat connaissait des bouleversements importants, les pratiques agricoles pourraient être modifiées et avoir un effet sur l'augmentation ou la diminution du carbone organique dans le sol.

La majeure partie de la diminution des émissions de CO_2 des sols a été contrebalancée par l'augmentation des émissions de CH_4 et de N_2O. De 1990 à 2005, les émissions de CH_4 du secteur agricole canadien ont crû de 24 % en raison de l'accroissement des populations de la plupart des animaux d'élevage. Comme on peut le voir à la figure 39, le cheptel canadien de bovins de boucherie a connu une hausse de 30 %, surtout imputable aux provinces des Prairies. De même, les populations de porcs et de volailles affichent une augmentation de 31 % et 23 %, respectivement. Seule la population de bovins laitiers a reculé, et ce dans une proportion de 29 %. L'escalade des émissions totales de CH_4 s'est donc poursuivie en raison de l'effet net de ces fluctuations à l'échelle du Canada.

FIGURE 39

Populations d'animaux de ferme au Canada (1990–2005)



Il existe un lien direct entre la population des animaux de ferme du Canada et les émissions de GES issues du secteur agricole. Cette population a subi une augmentation substantielle dans la plupart des catégories animales entre 1990 et 2005. Les cheptels de bœuf de boucherie et de porcs ont vu leur taille s'accroître de 30 % et de 31 %, respectivement, tandis que la population de volaille s'est élevée de 23 %. Seule la population des vaches laitières a connu une régression, de l'ordre d'environ 29 %.

Source : R. Desjardins et D. Worth, AAC, Dttawa (Ontario)

Le Canada a enregistré une hausse des émissions d'oxyde nitreux de l'ordre de 14 % entre 1990 et 2005, surtout en raison du recours accru aux engrais azotés synthétiques et de l'augmentation de la population animale. Les ventes d'engrais azotés synthétiques à l'échelle nationale sont passées de 1,20 à 1,54 Mt d'azote entre 1990 et 2005. L'augmentation du recours aux engrais azotés est exclusivement attribuable aux provinces des Prairies; dans toutes les autres provinces, il a reculé ou s'est maintenu au même niveau. Par ailleurs, l'accroissement de la population animale a contribué à la hausse des émissions de N_2O en raison de la production accrue de fumier. Finalement, les émissions imputables à l'apport d'azote des résidus de culture sont directement associées à la production des cultures, qui dépend des conditions météorologiques. Par exemple, c'est en 2002 – année où une grande sécheresse a entraîné une chute de la production des cultures de 44 % par rapport à 2005 – qu'on a enregistré les plus faibles émissions de N_2O provenant de la décomposition des résidus de culture pour toute la période allant de 1990 à 2005.

Incertitude des estimations des émissions de GES

Les pratiques de gestion agricole évoluent rapidement, le climat est variable d'une année à l'autre et les données précises sur l'agriculture sont difficiles à recueillir. Pour toutes ces raisons, l'estimation des émissions de GES du secteur agricole est entachée d'incertitude. Les experts canadiens ont longtemps cru que les émissions de N_2O étaient celles qui comportaient la plus grande incertitude, suivies par les émissions de CH_4, puis de CO_2. Toutefois, des analyses laissent croire que cette perception ne prend pas en compte adéquatement l'incertitude associée aux activités agricoles. En particulier, les estimations des variations des stocks de carbone dans le sol semblent plus incertaines que les estimations des émissions de CH_4, parce que l'incertitude est plus grande au chapitre des changements d'affectation des terres qu'à celui de la population du bétail. Malheureusement, il n'est pas possible pour l'heure de fournir des estimations d'erreurs quantitatives.

Tendances en matière d'émissions de GES

Selon Statistique Canada, entre 1991 et 2006, le nombre d'exploitations agricoles au Canada est passé de 280 043 à 229 373, et leur superficie moyenne est passée de 242 hectares à 295 hectares. Il est probable que cette tendance se maintienne.

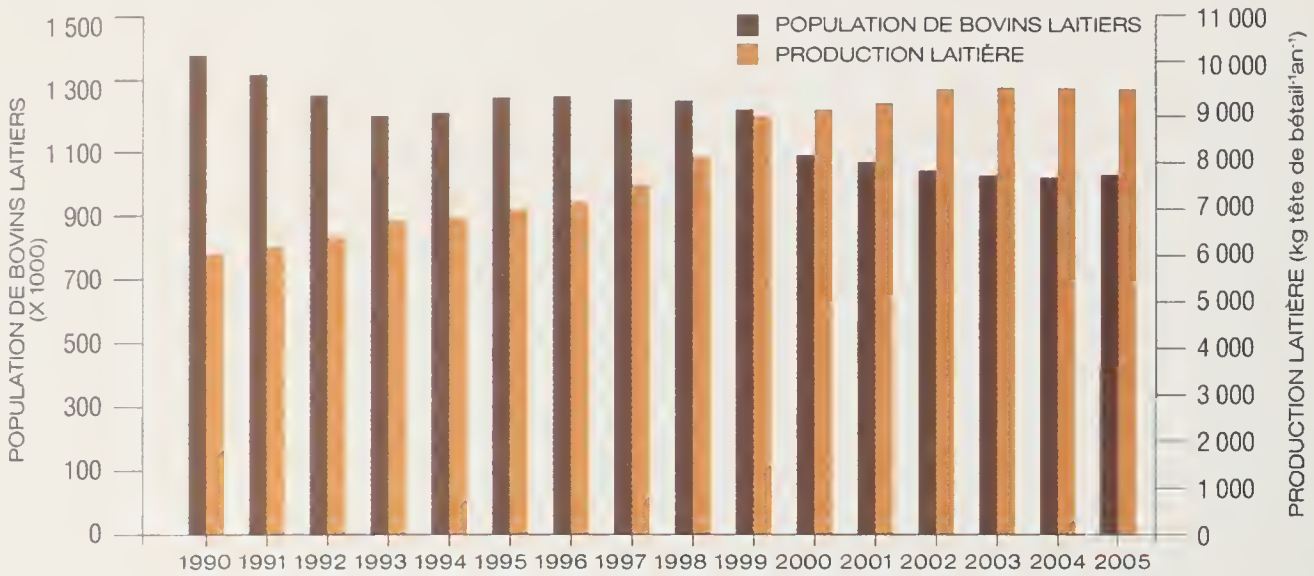
Durant la même période, la production des cultures s'est intensifiée, et le nombre d'animaux de boucherie s'est accru de façon marquée. En conséquence, entre 1990 et 2005, les émissions de N_2O, de CH_4 et celles du CO_2 provenant de la combustion des combustibles fossiles dans le secteur agricole canadien ont connu une hausse respective de 14 %, 24 % et 10 %. En raison de l'amélioration des pratiques agricoles en matière de conservation des sols, les terres agricoles qui étaient une source de 14 Mt de CO_2 ont atteint un bilan pratiquement neutre à cet égard. Il est probable que les sols agricoles canadiens deviendront un puits net de carbone dans un avenir rapproché. Néanmoins, il s'agira certainement d'un petit puits, et sa pérennité n'est pas assurée.

Les émissions de GES sont inévitables

Il faut voir les émissions de gaz à effet de serre comme un coût nécessaire à la production alimentaire, car elles sont un résultat inévitable de la culture et de l'élevage. L'augmentation de la population humaine se traduira par une demande alimentaire accrue. En conséquence, il est fort probable que les émissions de CH_4 et de N_2O poursuivent leur ascension alors que les fermes canadiennes répondront à cette demande. Puisque les émissions de GES constituent une perte d'énergie du système, elles continuent de faire l'objet de recherches en vue de trouver des pratiques plus efficaces qui réduisent ces pertes économiques. Les chercheurs ont établi que l'amélioration de l'efficacité de la production des cultures et de l'élevage des animaux ne se traduira que par une faible diminution des émissions de GES par unité de produit – et que ces réductions auront relativement peu d'effets sur les émissions totales de GES.

FIGURE 40A

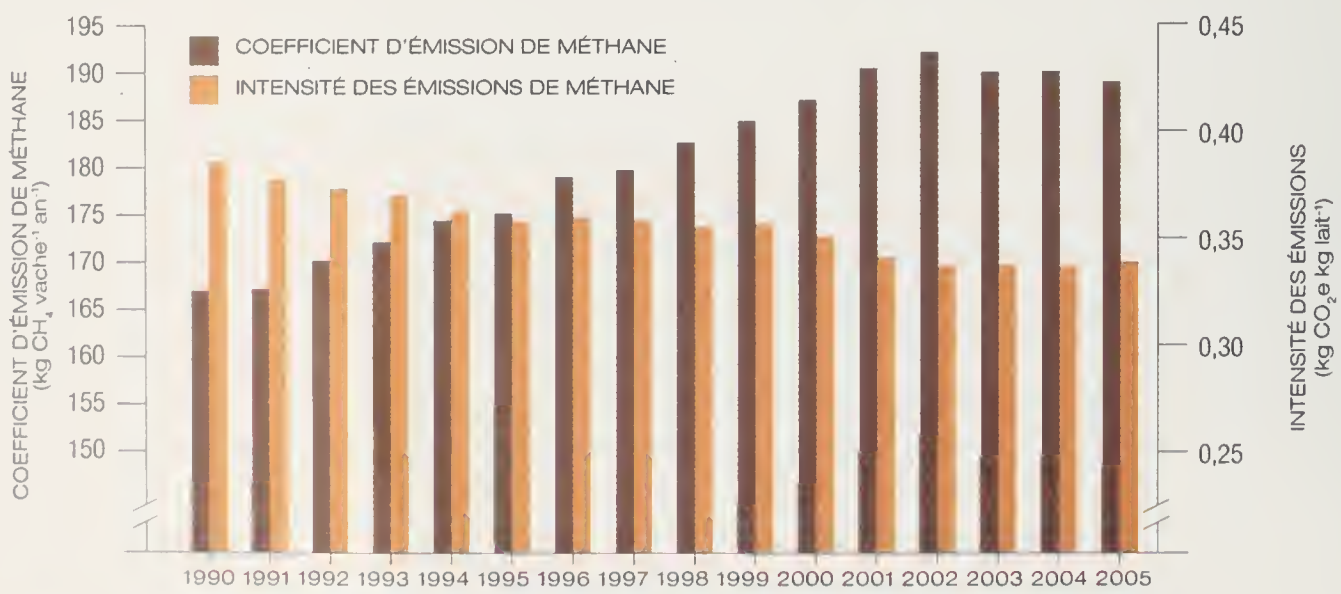
Populations de bovins laitiers et production laitière au Canada



Malgré la diminution de la population de bovins laitiers du Canada entre 1990 et 2005, la production laitière totale est demeurée relativement constante, car les vaches laitières sont devenues plus productives (graphique A). Cette élévation de la productivité s'est soldée par une augmentation des émissions entériques de CH_4 par vache. Par contre, si on exprime en unités par kg de lait produit les émissions de CH_4 attribuables à la fermentation entérique et à la gestion du fumier, on s'aperçoit qu'elles ont régressé de 13 % (graphique B).

FIGURE 40B

Coefficient d'émission de méthane pour les bovins laitiers (fermentation entérique et fumier) et émissions de CH_4 par kg de lait



Source : R. Desjardins et Y. Vergé, AAC, Ottawa (Ontario)

Pour parvenir à d'importantes réductions de ses émissions, notre société doit modifier son alimentation et trouver d'autres moyens de produire sa nourriture et de gérer ses déchets agricoles. Par exemple, la diminution de la consommation de produits animaux se traduirait par une réduction des émissions attribuables à la fermentation entérique et à la gestion du fumier. Il nous faut aussi modifier notre façon actuelle d'utiliser l'énergie. Le recours à des biocarburants à partir du biodiesel ou de la biomasse, et l'adoption à grande échelle de la biodigestion comme technique de gestion du fumier sont des mesures qui pourraient peut-être éliminer une proportion importante des émissions de GES provenant des combustibles fossiles. Par contre, une politique visant à augmenter la production de maïs et d'oléagineux pour combler nos besoins en bioénergie et à réduire l'élevage pourrait entraîner la disparition de champs de foin, de pâturages et même de forêts qui seraient convertis pour augmenter la superficie des terres destinées à la production. À court terme, à tout le moins, ces mesures augmenteraient considérablement les émissions de GES provenant de la décomposition du carbone organique dans le sol.

De toute évidence, il faut envisager la situation dans une perspective holistique prenant en compte toutes les activités agricoles afin de déterminer les politiques optimales qui permettront de réduire les émissions de GES, aussi bien à court qu'à long terme.

UN EXEMPLE CONCRET

Comme on peut le voir à la figure 40, les émissions de CH_4 par litre de lait produit sont en diminution. L'amélioration de l'élevage des bovins laitiers s'est soldée par une augmentation de 21 % de la production laitière par tête entre 1990 et 2005 – et par une réduction parallèle de 29 % de la population de bovins laitiers. La hausse de la production de lait par vache s'est accompagnée d'une élévation des émissions de CH_4 par vache au cours de la même période. Malgré tout, l'augmentation des émissions de CH_4 a été plus faible que celle de la production laitière. Au bout du compte, les émissions de CH_4 ont été réduites d'environ 13 % par unité de lait produit.

LECTURES COMPLÉMENTAIRES

Desjardins, R.L., et coll., « Gaz à effet de serre », p. 150–156 dans Lefebvre, A., W. Eilers et B. Chunn (éd.), « L'agriculture écologiquement durable au Canada : Série sur les indicateurs agroenvironnementaux - Rapport n° 2 », 2005, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Ottawa. En ligne à : http://www.agr.gc.ca/env/naharp-pnarsa/index_f.php?page=aei. Consulté le 23 octobre 2007.

Environnement Canada, « Rapport d'inventaire national 1990–2005 : Sources et puits de gaz à effet de serre Canada », 2007, Environnement Canada, Division des gaz à effet de serre.

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), « Bilan 2001 des changements climatiques : Les éléments scientifiques, contribution du Groupe de travail I au troisième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat », Cambridge University Press, New York, 2001. (Résumé à l'intention des décideurs et Résumé technique)

Statistique Canada, « Superficie agricole totale, mode d'occupation et terres en culture, par province (recensements de l'agriculture de 1986 à 2006) », 2007. En ligne à : http://www40.statcan.ca/l02/cst01/agrc25a_f.htm. Consulté le 23 octobre 2007.

Smith, W., R.L. Desjardins et B. Grant, « Estimated changes in soil carbon associated with agricultural practices in Canada », *Revue canadienne de la science du sol*, 2001, vol. 81, p. 221–227.

Les quantités

Faire le bilan

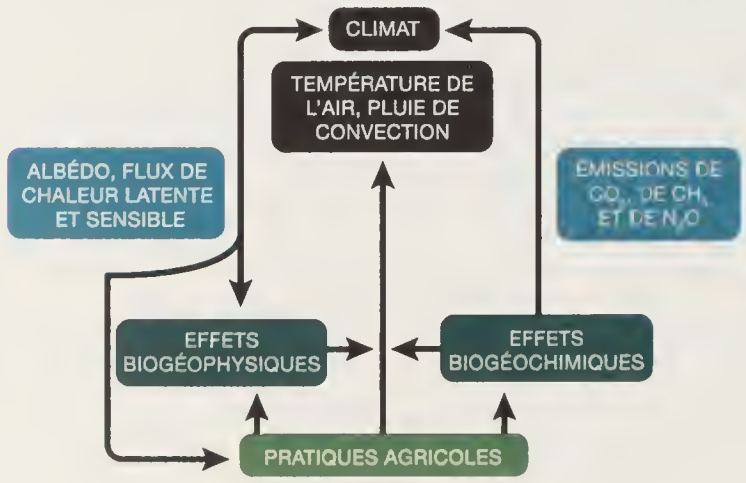
LES EFFETS DE L'AGRICULTURE SUR LE CLIMAT QUI SONT LIÉS À DES FACTEURS AUTRES QUE LES GAZ À EFFET DE SERRE

La production agricole est largement tributaire des conditions météorologiques et du climat. Faute de précipitations adéquates et de températures appropriées, les cultures périclitent et les pâturages deviennent stériles. Fait intéressant, l'inverse est tout aussi vrai : les conditions météorologiques et le climat sont influencés par les pratiques agricoles. En effet, l'aménagement des terres cultivées et des pâturages agit sur plusieurs interactions physiques, chimiques et biologiques entre la surface de la Terre et l'atmosphère, ce qui peut avoir divers effets sur la température de l'air et les précipitations.

Il est largement admis aujourd'hui que les GES émis par l'agriculture agissent sur la température de l'air et contribuent ainsi à l'effet de serre anthropique (causé par l'humain). L'agriculture a donc un effet dit *biogéochimique* sur le climat, qui est illustré à la figure 41. Il existe toutefois un phénomène moins connu par lequel l'agriculture agit sur les conditions météorologiques et le climat : son effet sur l'albédo de la Terre. L'albédo est la fraction du rayonnement solaire qui atteint la Terre pour être ensuite réfléchie dans l'espace. L'albédo est l'un des effets *biogéophysiques* qui agit sur les conditions météorologiques et le climat, et il constitue l'un des principaux facteurs qui déterminent le climat.

FIGURE 41

EFFETS BIOGÉOPHYSIQUES ET BIOGÉOCHIMIQUES SUR LE CLIMAT



Les pratiques agricoles agissent sur le climat en modifiant les échanges d'énergie entre les cultures et l'atmosphère – c'est un effet biogéophysique sur le climat. Elles peuvent aussi agir sur le climat en modifiant la vitesse des échanges de gaz à effet de serre entre le sol et les plantes et l'atmosphère – c'est un effet biogéochimique sur le climat.

L'importance de l'albédo

L'albédo d'une surface donnée ou d'une couverture terrestre a un effet sur la température de cette surface et sur celle de l'air sus-jacent. Les divers types de couverture terrestre ont des albédos différents. Les températures des couvertures terrestres dont l'albédo est élevé – la glace et la neige – sont généralement basses parce qu'elles réfléchissent dans l'espace un pourcentage élevé (35 à 90 %) du rayonnement solaire incident. Les couvertures terrestres dont l'albédo est le plus faible – comme les prairies et les forêts – sont généralement caractérisées par des températures élevées, car elles ne réfléchissent dans l'espace qu'un faible pourcentage (5 à 25 %) du rayonnement incident. À l'échelle planétaire, l'albédo moyen de la Terre est d'environ 30 %.

Une connaissance approfondie des albédos des divers types de couverture terrestre est donc un élément important dans notre compréhension globale du climat. Par exemple, les scientifiques ont présumé par le passé que l'albédo de la forêt boréale était élevé l'hiver, en raison de la présence de neige. En réalité, la couverture neigeuse n'augmente que marginalement l'albédo de la forêt boréale, parce que la neige s'accumule sous le couvert forestier. C'est pourquoi les modèles de prévisions météorologiques ont sous-estimé les températures quotidiennes hivernales dans les régions boréales, et ce dans une mesure pouvant atteindre 10 °C. Par contre, l'albédo des prairies est considérablement augmenté par le manteau neigeux. En conséquence, la différence au chapitre du bilan radiatif entre les prairies et les forêts de conifères est faible au printemps, à l'été et à l'automne, mais importante l'hiver.

Ce facteur revêt une certaine importance, car, contrairement à la croyance populaire, le fait de planter des arbres dans les régions agricoles situées à des latitudes élevées peut *contribuer* au réchauffement planétaire au lieu de ralentir son évolution. La couleur sombre du couvert forestier au Canada, en Scandinavie et en Sibérie absorbe le rayonnement solaire qui, autrement, serait réfléchi vers l'espace par la neige si ces régions étaient des terres agricoles.

Pour approfondir

Les effets biogéochimiques et biogéophysiques de l'agriculture sur le climat sont quantifiés en fonction de l'énergie résultante reçue à la surface de la Terre, exprimée en watts par mètre carré (Wm^{-2}). Lorsque la valeur est supérieure à zéro – c'est ce qu'on appelle un *forçage radiatif positif* – elle indique un réchauffement, et lorsqu'elle est inférieure à zéro – *forçage radiatif négatif* – elle indique un refroidissement.

Si l'on analyse la relation entre la température globale et les changements naturels en matière de forçage radiatif, on estime que la température moyenne à long terme augmente de l'ordre de 0,4 à 0,7 °C chaque fois que le forçage radiatif net augmente de 1 Wm^{-2}. La figure 42 présente les estimations et les plages des forçages radiatifs moyens dans le monde en 2005 pour les émissions anthropiques de CO_2, de CH_4, de N_2O et à d'autres facteurs de forçage radiatif associés aux aérosols, à l'utilisation des terres, à l'ozone et aux variations de l'irradiance solaire.

Les fluctuations de l'activité solaire sont considérées comme un facteur de forçage naturel. On constate que, pendant les périodes où l'activité solaire est élevée, la température est supérieure d'environ 0,2 °C à celle qu'on observe lorsque l'activité solaire est faible, et que le réchauffement est amplifié à proximité des pôles de la Terre.

Le forçage radiatif positif le plus important est attribuable à l'augmentation des concentrations atmosphériques de GES à court et à long terme, et il se chiffre à + 3,0 Wm^{-2}. Le forçage radiatif négatif le plus important est imputable à l'effet direct et indirect des aérosols en suspension dans l'air, et il s'élève à -1,5 Wm^{-2}. La somme de tous les forçages anthropiques positifs et négatifs donne un forçage positif net d'environ +1,5 Wm^{-2}. La plupart de ces forçages agissent à l'échelle planétaire, à l'exception de l'albédo de surface dont l'effet se fait plutôt ressentir à l'échelle locale. Les facteurs de forçage naturels, comme les aérosols volcaniques, ne sont pas pris en compte en raison de leur nature épisodique. Ils ont tendance à causer un forçage négatif temporaire.

Bilan énergétique et température de l'air

Les changements d'affectation des terres et de couverture terrestre ont des effets sur le climat en modifiant le bilan énergétique de surface. Comme le montre la figure 43, le bilan radiatif de la surface de la Terre, Q_n, est calculé de la façon suivante : le rayonnement solaire incident à courtes longueurs d'onde ($S\downarrow$) moins le rayonnement solaire réfléchi à courtes longueurs d'onde ($S\uparrow$), plus la différence entre le rayonnement à grandes longueurs d'onde émis vers la Terre par l'atmosphère ($L\downarrow$) et le rayonnement à grandes longueurs d'onde émis par la Terre ($L\uparrow$) :

$$Q_n = (S\downarrow - S\uparrow) + (L\downarrow - L\uparrow)$$

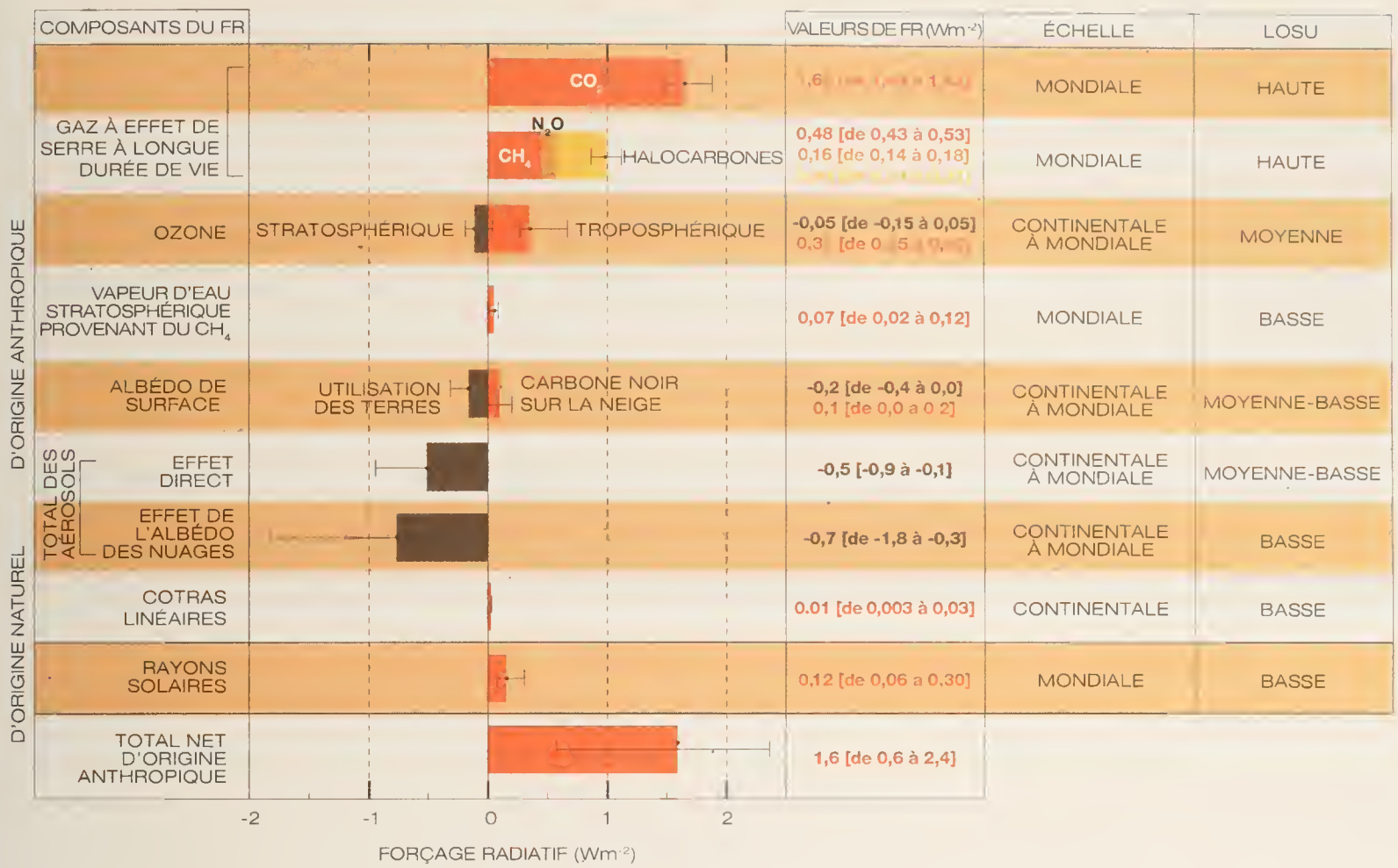
Une partie du bilan radiatif représente l'énergie utilisée pour réchauffer l'air, le flux de chaleur sensible (Q_H), une autre l'énergie utilisée pour l'évapotranspiration, le flux de chaleur latente (Q_L), et une dernière la chaleur absorbée ou émise par le sol (Q_G) :

$$Q_n = Q_L + Q_H + Q_G$$

Toute augmentation du forçage radiatif attribuable à des changements biogéochimiques de la composition de l'atmosphère s'explique principalement par une augmentation du contre-rayonnement atmosphérique, ($L\downarrow$) d'où l'analogie avec une serre. Ce sont donc principalement les températures nocturnes, ou minimales, qui sont touchées quand le rayonnement à courtes longueurs d'onde n'entre pas en jeu dans le bilan radiatif de la surface de la Terre. À l'inverse, les effets biogéophysiques, comme les changements de l'albédo de surface ou de l'humidité de la végétation et du sol, ont surtout des répercussions sur les températures diurnes maximales.

FIGURE 42

Facteurs de forçage radiatif

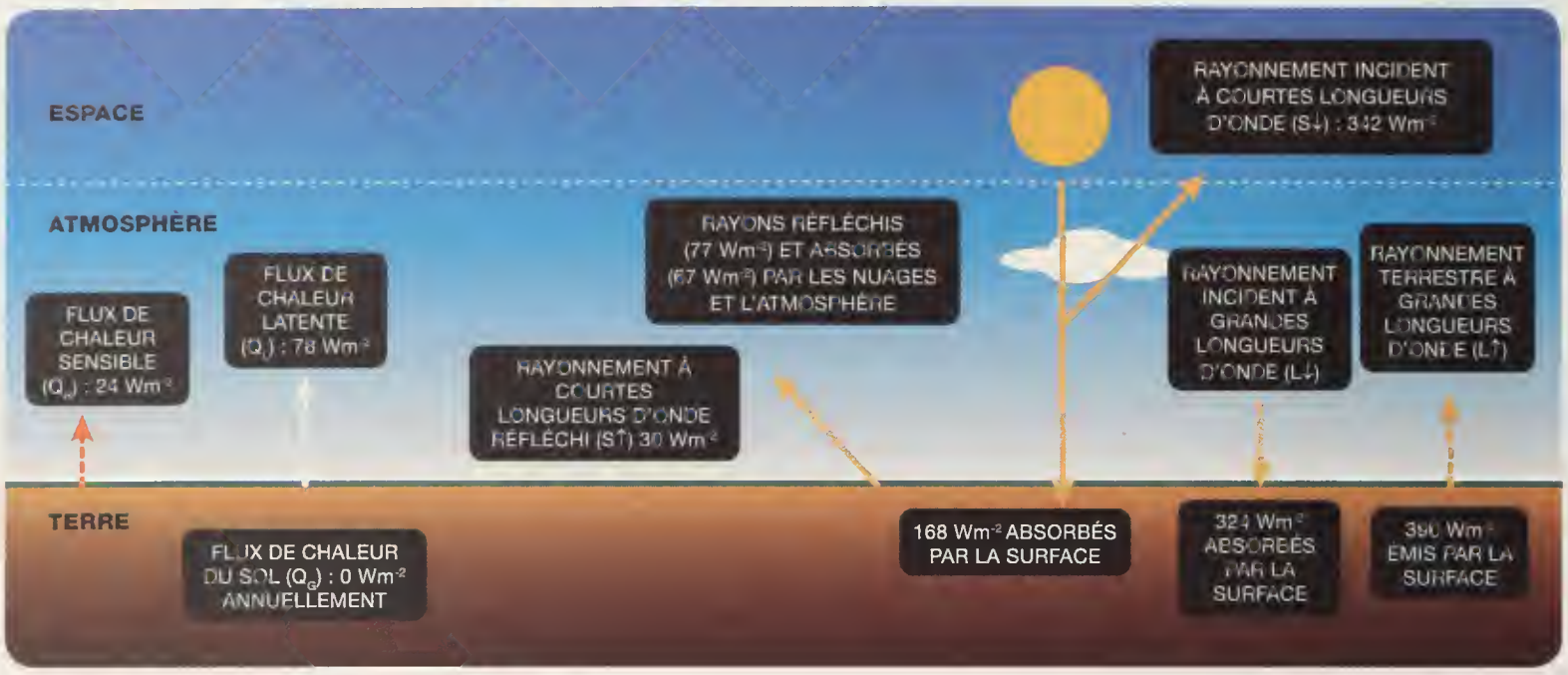


Il existe de nombreux facteurs anthropiques qui contribuent au forçage radiatif (FR). Les facteurs les plus importants comprennent les émissions de gaz à effet de serre (GES), tels que le CO_2, le CH_4, le N_2O et les hydrocarbures halogénés (utilisés comme solvants et fluides frigorigènes), les changements de l'ozone stratosphérique et troposphérique ainsi que les fluctuations de l'albédo attribuables aux changements d'affectation des terres, au dépôt de carbone noir sur la neige et aux changements des concentrations d'aérosols dans l'atmosphère. Les émissions de GES sont le plus important forçage anthropique du climat. Il existe aussi des forçages radiatifs naturels, dont le lent changement avec le temps de l'intensité du rayonnement solaire. Ce forçage naturel est beaucoup moins important que la somme des forçages anthropiques, dont la valeur est estimée à +1,6 Wm^{-2}, avec une plage d'incertitude se situant entre +0,6 et +2,4 Wm^{-2}. Les émissions de GES d'origine agricole, qui sont un effet biogéochimique, et le changement de l'albédo attribuable à la conversion de terres en terres agricoles sont les forçages traités dans le présent chapitre. Cette figure montre également l'échelle spatiale du forçage et le niveau actuel de compréhension scientifique.

Source : Quatrième rapport d'évaluation du Groupe de travail I du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, *Résumé à l'intention des décideurs.* En ligne à . www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-spm-fr.pdf. Consulté le 25 janvier 2008.

FIGURE 43

Échange énergétique entre la surface de la Terre et l'atmosphère

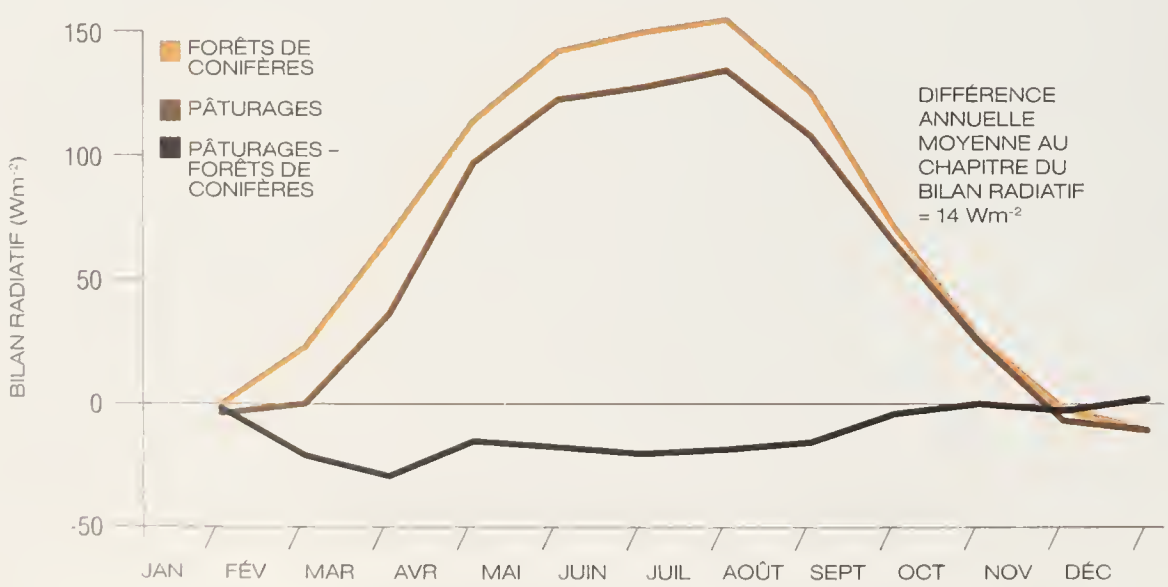


Il existe des échanges continus de vapeur d'eau et d'énergie entre la surface de la Terre et l'atmosphère. L'énergie de rayonnement solaire est soit réfléchie, soit convertie en chaleur sensible qui réchauffe l'air ou en chaleur latente qui évapore l'eau, ou encore transférée dans le sol sous forme de chaleur ou réémise dans l'atmosphère sous forme de rayonnement à grandes longueurs d'onde.

Source : L'ampleur du bilan énergétique global et annuel de la Terre est adaptée de Kielhl et Trenberth, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997.

FIGURE 44

Bilan radiatif au-dessus des forêts (de conifères) et des pâturages



Les conifères conservent leurs aiguilles toute l'année et absorbent donc très efficacement le rayonnement solaire même l'hiver, alors que les prairies sont couvertes de neige. La différence annuelle moyenne entre le bilan radiatif des forêts de conifères et celui des prairies est d'environ 14 Wm-2. À titre de comparaison, la différence annuelle moyenne entre le bilan radiatif des forêts de conifères et celui des forêts de feuillus est d'environ 10 Wm-2.

Source : R. Desjardins et D. Worth, AAC, Ottawa (Ontario)

L'agriculture peut influer sur la température de l'air

Les répercussions biogéophysiques de l'agriculture sur la température de l'air représentent un problème considérable à l'échelle locale et continentale. L'accroissement de la population humaine et les besoins qui en découlent en matière de production alimentaire ont entraîné la conversion de vastes superficies de terres à l'état naturel en terres cultivées et en pâturages. Au cours des trois derniers siècles, la superficie des terres cultivées a plus que quintuplé, et celle des pâturages a plus que sextuplé. Plus récemment, l'augmentation de la superficie des terres cultivées et des pâturages s'est surtout faite aux dépens des forêts. Ce phénomène a modifié le bilan radiatif mondial de la surface de la Terre.

À l'heure actuelle, on estime que la conversion de terres forestières en terres agricoles a provoqué une élévation de l'albédo de surface, qui se traduit par un refroidissement global du climat de l'ordre de 0,1 °C. Par ailleurs, on estime que si toutes les forêts étaient remplacées par des prairies, le climat mondial subirait un refroidissement de plus de 2 °C une fois que les effets du changement terre-couverture se seraient manifestés.

Les cultures peuvent influer sur le moment de survenue des orages et des phénomènes météorologiques violents

Pendant leur croissance, les plantes transpirent; en d'autres termes, elles absorbent de l'eau du sol et la rejettent dans l'atmosphère. Le taux de transpiration varie au cours de la croissance des plantes; la proportion de chaleur sensible (énergie utilisée pour chauffer l'air) par rapport à la chaleur latente (énergie utilisée pour l'évapotranspiration) est donc modifiée. Des scientifiques ont montré que, pour un rayonnement solaire équivalent, plus l'évapotranspiration est importante, plus le risque d'orages est élevé. Ainsi, dans les Prairies canadiennes, la conversion de grandes étendues de graminées vivaces indigènes pour y pratiquer des cultures annuelles de grande production pourrait avoir modifié le régime saisonnier des jours d'orage. Les scientifiques ont établi que l'agriculture a diminué le risque d'orages au début et à la fin de la saison de croissance, tout en l'augmentant à la mi-saison, période où la croissance rapide des feuilles s'accompagne d'une transpiration élevée.

L'agriculture influe aussi sur la disponibilité de la vapeur d'eau, donc la fréquence de la pluie, dans certaines régions du globe. Dans le cas des Prairies canadiennes, les chercheurs ont établi que, dans les régions recevant une quantité normale de pluies en été, 20 % de l'humidité provenait des zones agricoles. Les cultures sont donc une source importante de vapeur d'eau favorisant les pluies pendant la saison de croissance et jouent ainsi un rôle dans la durée des périodes humides et sèches.

Répercussions des mesures d'atténuation des GES sur la température de l'air

Les changements des pratiques de gestion agricole peuvent non seulement avoir des effets sur la météo, mais ils peuvent aussi réduire la vitesse d'accumulation du CO_2 dans l'atmosphère en séquestrant le carbone dans les terres agricoles. À l'échelle mondiale, on estime que les terres agricoles pourraient devenir un puits de carbone considérable au cours du prochain siècle.

Si cette possibilité existe, c'est que les stocks de carbone du sol ont été considérablement appauvris au Canada et partout dans le monde par diverses pratiques agricoles. Les scientifiques croient que l'adoption de pratiques agricoles favorisant l'augmentation de la teneur du sol en carbone pourrait permettre de séquestrer dans les sols canadiens chaque année une quantité de CO_2 équivalente à celle qui est émise par 2,5 millions de voitures de taille moyenne. En améliorant ces pratiques, on pourrait faire des sols agricoles canadiens un puits encore plus efficace. Consultez le chapitre sur le carbone pour obtenir une explication complète du processus de séquestration du carbone dans les sols et des pratiques agricoles qui y contribuent le mieux.

On a constaté que la réduction des superficies des jachères dans les Prairies au cours des dernières années a favorisé la séquestration du carbone dans les sols agricoles. On peut donc dire que l'effet biogéochimique de la diminution des jachères est le refroidissement de la température de l'air. On estime que l'intensification des cultures entre 1976 et 2000 dans les provinces des Prairies, où les cultures et fourrages annuels ont remplacé les jachères, a été associée à une diminution de 1,7 °C par décennie de la température maximale de l'air et à une élévation de 10 mm par décennie des précipitations, entre le 15 juin et le 15 juillet.

Ce phénomène est sans doute attribuable au fait que le flux de chaleur sensible est plus important dans les jachères que dans les terres cultivées, tandis que le flux de chaleur latente est plus élevé dans les terres cultivées que dans les jachères. C'est ce dernier effet qui ajoute de l'humidité dans l'atmosphère. La conversion de terres en jachère en terres cultivées tend à abaisser la température de l'air et à accroître l'humidité dans l'air, ce qui se solde par une augmentation des précipitations.

Les impacts biogéochimiques et biogéophysiques des stratégies d'atténuation des GES sur le climat ne sont pas tous complémentaires. Comme on a pu le comprendre dans la section sur l'albédo, le fait de planter des arbres – en particulier des conifères – sur des terres agricoles dans les écosystèmes nordiques élève la température de l'air en réduisant l'albédo, ce qui neutralise l'effet bénéfique pour le climat de la capacité des arbres à absorber le CO_2 et à stocker le carbone. En résumé, au Canada, l'effet biogéophysique de la conversion en forêts d'un hectare de terres

utilisées pour la culture du blé jouerait un rôle plus important dans le changement climatique que l'effet biogéochimique de la séquestration de 60 tonnes de carbone par cet hectare de terres pendant les 50 prochaines années.

De toute évidence, les pratiques agricoles peuvent influer sur les conditions météorologiques et le climat mondial par le truchement d'un forçage biogéochimique et biogéophysique. On pourrait illustrer ce phénomène par de nombreux autres exemples. Ainsi, l'irrigation entraîne un abaissement de la température de l'air, pouvant atteindre 5 °C à l'échelle locale et possiblement 1 °C à l'échelle régionale, en augmentant la couverture nuageuse qui réfléchit le rayonnement solaire. De même, la réduction du travail du sol, une tendance relativement récente, augmente l'albédo ce qui a un effet de refroidissement comparable au refroidissement d'origine biogéochimique attribuable à la séquestration du carbone.

Il est donc primordial de prendre en compte les effets d'une vaste gamme de pratiques de gestion agricole dans les régions où les systèmes de production sont vulnérables aux changements météorologiques. Il est improbable que les effets liés à des facteurs autres que les gaz à effet de serre puissent compenser l'augmentation des GES attribuable aux pratiques agricoles, mais il faut incontestablement prendre en compte leurs effets sur le climat.

LECTURES COMPLÉMENTAIRES

Betts, R.A., « Offset of the potential carbon sink from boreal forestation by decreases in surface albedo », *Nature*, 2000, vol. 408, p. 187–190.

Desjardins, R.L., M.V.K. Sivakumar et C. de Kimpe (éd.), « The contribution of agriculture to the state of climate », numéro spécial de *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, Elsevier, Oxford, R.-U., 2007, p. 88–324.

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), « Bilan 2001 des changements climatiques : Les éléments scientifiques, contribution du Groupe de travail I au troisième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat », Cambridge Univ. Press, New York, 2001, p. 97 (Résumé à l'intention des décideurs et Résumé technique).

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), « Bilan 2007 des changements climatiques : Les bases scientifiques physiques. Résumé à l'intention des décideurs ». En ligne à : http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-frontmatter-fr.pdf. Consulté le 15 février 2007.

Raddatz, R.L., « Moisture recycling on the Canadian Prairies for summer drought and pluvials from 1997–2003 », *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, vol. 131, p. 13–26.

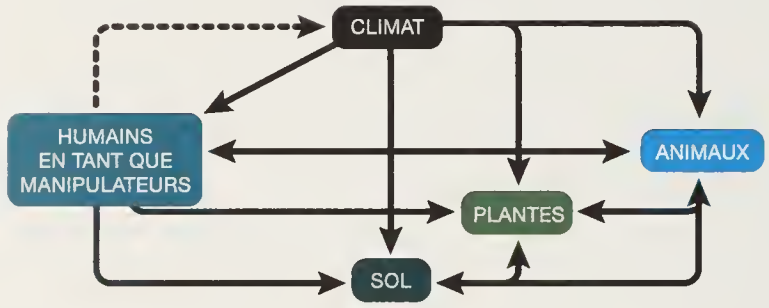
Une perspective holistique

EXPLORER LA PERSPECTIVE ÉCOSYSTÉMIQUE

L'écosystème – terme formé à partir des mots *système* et *écologique* – est l'unité fondamentale d'étude de l'écologie. On voit apparaître ce terme pour la première fois dans des textes publiés en 1935 (bien qu'il ait été inventé bien plus tôt), où il désigne une collectivité d'organismes vivants et le milieu dans lequel ils évoluent ainsi que toutes les interactions entre ces organismes (figure 45).

FIGURE 45

ÉLÉMENTS D'UN ÉCOSYSTÈME ET INTERACTIONS ENTRE CES ÉLÉMENTS



Source : D'après Van Dyne, 1969

Un écosystème comprend donc non seulement les herbacées, les arbres et les mousses croissant sur le sol d'une région donnée ainsi que les hiboux, les fourmis et les bisons qui s'en nourrissent, mais également les sols et l'air qui assurent la subsistance de tous ces organismes. Lorsqu'on utilise le terme écosystème, on parle aussi des interactions par lesquelles chacun de ses éléments constituants agit sur les autres, assurant la parfaite cohérence du système en entier.

La taille d'un écosystème est extrêmement variable. L'écosystème peut se limiter à une ruche ou englober la totalité de la biosphère, mais sa taille peut généralement s'exprimer en hectares ou en kilomètres carrés. Quelle que soit son ampleur, un écosystème occupe un lieu précis, qui possède des coordonnées fixes et des frontières bien définies. Les écosystèmes sont toujours des systèmes ouverts. Autrement dit, l'énergie et la matière qui les constituent sont continuellement perdues et remplacées. C'est pourquoi, de par leur nature, les écosystèmes dépendent les uns des autres.

Les écosystèmes sont incroyablement complexes, et leur compréhension exige une expertise et des connaissances dans diverses disciplines – ainsi qu'un moyen d'intégrer toute cette information pour qu'elle puisse être comprise, expliquée et utilisée. Le temps est un autre facteur qui ajoute à la complexité des écosystèmes. En effet, les écosystèmes ne peuvent être étudiés hors de toute perspective historique, car les systèmes vivants changent. Les activités qui y prennent place et les conditions qui y règnent à un moment donné dépendent de ce qui s'est produit auparavant au même endroit. Malgré cette complexité effarante, il y a un grand avantage à considérer toute forme de vie comme un élément d'un écosystème : cette perspective nous permet d'étudier les systèmes vivants dans leur ensemble – ou plutôt, elle nous y oblige – ce qui évite les distorsions inhérentes à l'étude de leurs éléments pris isolément.

Une vision élargie

Il fut une époque où ceux qui étudiaient les écosystèmes cherchaient des sites dont le sol n'avait jamais été foulé par l'homme. De nos jours, on admet que ces lieux ont à peu près disparu. Les humains font donc maintenant partie intégrante de la plupart des écosystèmes et sont inextricablement liés à d'autres organismes et à leurs interactions. En effet, si la définition d'un écosystème inclut tous les organismes qui occupent son territoire et les interactions qui interviennent entre eux, nous ne pouvons nous en exclure. Les terres agricoles sont certainement l'un des endroits où notre influence sur le milieu est la plus profonde.

Les fermes sont des écosystèmes

Les exploitations agricoles sont souvent perçues comme des entités économiques avant toute chose, car elles sont le gagne-pain de leurs propriétaires. Dans une perspective écologique plus large, les exploitations agricoles peuvent également être considérées comme des écosystèmes qui ont de nombreuses fonctions, dont l'une seulement consiste à générer un revenu. Cette perspective comporte plusieurs avantages. Tout d'abord, elle impose une vision holistique. Il devient donc impossible de dissocier les bovins des cultures, les terres des étables ou l'air des engrais. Ensuite, cette perspective écosystémique nous aide à prendre en compte les interactions entre les fermes et leur milieu. En devenant des écosystèmes, les exploitations agricoles s'inscrivent dans le continuum de la biosphère au même titre que les forêts et les milieux humides, les prairies et les lacs, qui sont tous étudiés à l'aide de méthodes similaires s'intéressant, entre autres, aux échanges d'énergie et de matière entre eux.

Les écosystèmes agricoles, ou agroécosystèmes, se distinguent toutefois des autres sur quelques points. D'une part, ils sont délibérément maintenus au stade de début de succession (par opposition à une végétation mature de longue date). Ils sont donc plus ouverts que les autres écosystèmes. En raison d'importants prélèvements d'énergie et de matière, ils dépendent d'apports tout aussi considérables à cet égard pour assurer leur pérennité.

Les exploitations agricoles sont incroyablement diversifiées, les activités qui s'y déroulent étant le reflet des terres sur lesquelles elles sont situées et des gens qui y vivent. On y trouve de tout : du troupeau de moutons élevé dans un désert clairsemé aux vaches laitières engraissées dans des pâturages luxuriants et des vastes champs de blé cultivés à l'aide de machines aux petites productions artisanales de framboises. Les activités agricoles, quelles qu'elles soient, sont toutes fondées par les mêmes processus écologiques.

Comparativement aux autres écosystèmes, celui des exploitations agricoles subit d'importantes manipulations. Les producteurs choisissent les plantes cultivées, les nutriments appliqués, le type et le nombre d'animaux élevés, les insectes tolérés ou non, le degré d'arrosage et de drainage ainsi que le degré de perturbation du sol par le labour. Bon nombre de ces décisions reposent sur des facteurs économiques et sociaux conjoncturels, ce qui signifie que les pratiques et les conditions imposées aux écosystèmes agricoles peuvent changer de façon imprévisible et sporadique.

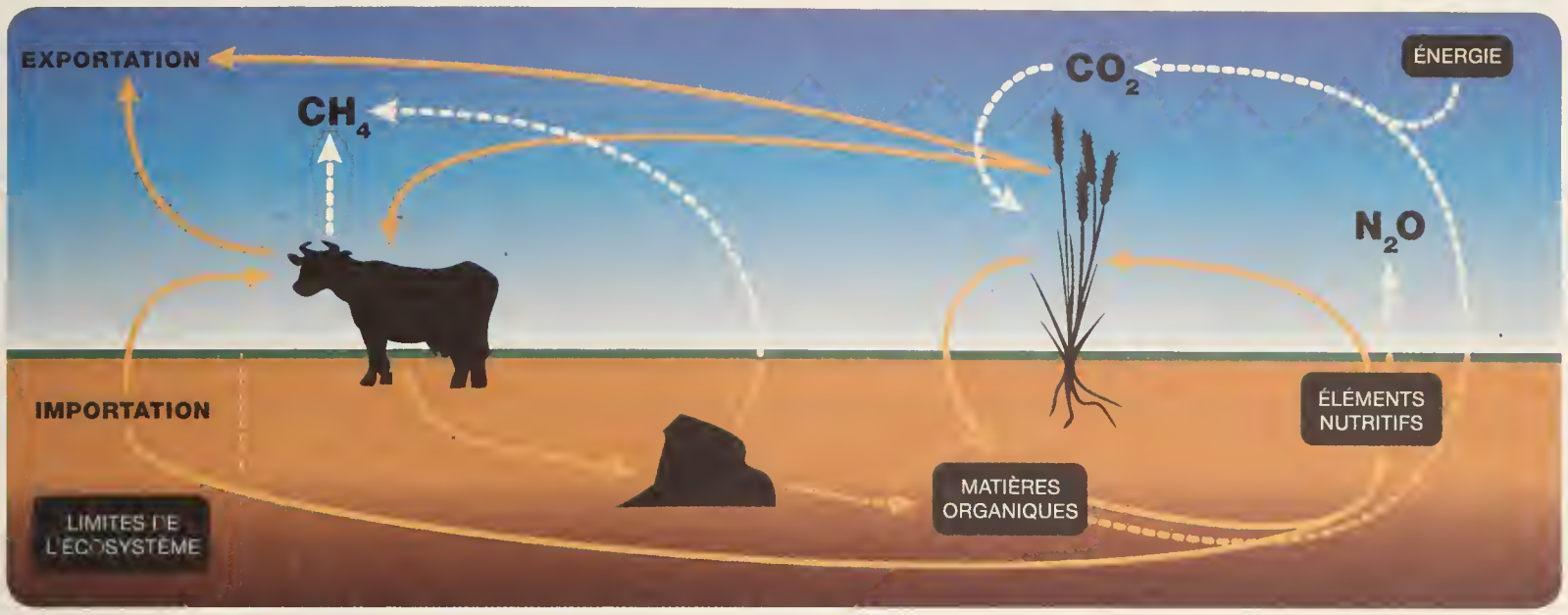
Le fait de considérer les fermes comme des écosystèmes pose toutefois certains défis : les exploitations agricoles sont complexes, extrêmement dynamiques et exposées aux caprices de l'intervention humaine. Mais on peut aussi y voir des avantages évidents : cette perspective nous aide, entre autres, à mettre en relation tous les processus d'une ferme pour déterminer leurs effets nets à l'intérieur de l'écosystème et au-delà, et ce aussi bien à court qu'à long terme. En outre, le fait de considérer chaque exploitation agricole comme un écosystème correspond tout à fait à la définition même d'écosystème en tant qu'unité écologique fondamentale. Après tout, les fermes sont les unités de base sur lesquelles les producteurs exercent un contrôle, en choisissant des pratiques et des méthodes de gestion.

Les GES font partie de nos écosystèmes agricoles

En assimilant les exploitations agricoles à des écosystèmes, on obtient un point de vue privilégié pour l'étude des émissions de GES. En fait, il est même possible que la perspective écosystémique soit la *seule* valable pour l'étude des émissions de GES. Comme on peut le voir à la figure 46, les flux de GES sont associés à une multitude de procédés reliant tous les aspects du système agricole. Par conséquent, les efforts déployés pour réduire les émissions d'un gaz provenant d'une source peuvent neutraliser (ou amplifier) les effets ailleurs; l'effet global d'une mesure ne peut donc être établi qu'en évaluant les émissions *nettes*. En d'autres termes, les émissions ne peuvent être quantifiées de façon valable qu'en adoptant une démarche écosystémique.

FIGURE 46

INTERRELATIONS ENTRE LES FLUX DE CARBONE, D'AZOTE ET D'ÉNERGIE DANS LES AGROÉCOSYSTÈMES



Prenons pour exemples certaines interactions entre les divers flux sur une ferme, dont la principale est peut-être l'absorption du CO_2 atmosphérique par le stockage du carbone dans le sol – phénomène appelé *séquestration dans le sol*. De nombreuses études menées partout dans le monde montrent que, dans certaines conditions, on peut augmenter la teneur du sol en carbone par des pratiques telles que la réduction du travail du sol, qui diminue la perturbation du sol, ou le réensemencement de graminées sur certaines terres, ce qui permet au carbone des plantes d'être restitué au sol dans une plus grande proportion. Par contre, de telles pratiques ont presque invariablement des effets sur d'*autres* facteurs et processus. Par exemple, la réduction du travail du sol peut parfois augmenter l'humidité du sol, ce qui réduit l'aération et favorise la libération de N_2O. Par ailleurs, le recours au semis direct sur les terres plus arides peut entraîner une *réduction* des émissions de N_2O. D'une manière ou d'une autre, pour mesurer l'effet net de la pratique, il faut tenir compte non seulement du carbone séquestré, mais également de l'ensemble des effets sur les émissions de N_2O, un puissant GES. Ces changements de pratique ont aussi des effets potentiels sur l'ensemble de l'écosystème. Ainsi, la réduction de l'intensité du travail du sol peut se traduire par une diminution du recours aux combustibles fossiles – donc des émissions de CO_2 – ou par une augmentation temporaire de l'application d'engrais, ce qui accroît les émissions provenant des combustibles utilisés pour l'épandage. Le temps est un facteur qui vient compliquer davantage l'équation. En effet, les diverses réactions aux changements de pratiques, comme l'accumulation de carbone dans le sol et les émissions de N_2O, ou l'absorption de CH_4 et les émissions de CO_2 provenant de l'utilisation d'énergie, n'interviennent pas à la même échelle temporelle. Certaines réactions, comme la séquestration du carbone, sont temporaires, alors que d'autres, telles que la réduction des émissions de CO_2 provenant de l'utilisation d'énergie, persistent indéfiniment. On constate donc que chaque pratique a des effets qui se répercutent sur les émissions de GES dans tout le système. C'est pourquoi la démarche écosystémique est la seule qui puisse déterminer l'effet global de ces pratiques.

On peut appliquer le même raisonnement à d'autres exemples. En adoptant de nouvelles pratiques en matière d'alimentation du bétail, on peut réduire les émissions de CH_4 de façon efficace. Par contre, pour connaître l'effet global d'une telle mesure, on doit aussi se poser les questions suivantes : Quelles sont les émissions associées à la production de cette nouvelle culture destinée à l'alimentation animale? Quels sont les effets de cette nouvelle alimentation sur les émissions provenant du fumier produit, dont la composition a été conséquemment modifiée? Quels sont les effets de cette nouvelle pratique sur le nombre d'animaux alimentés et sur les émissions qui en résultent?

Examinons maintenant l'adoption d'une autre pratique, qui fait actuellement l'objet de nombreuses études sérieuses : la production de biocarburants à partir de plantes cultivées. L'éthanol ou le biodiesel, extraits à partir de certaines cultures, réduisent efficacement les émissions de CO_2 provenant des combustibles fossiles. Bien que la combustion des biocarburants génère aussi du CO_2, ce dernier provient du carbone atmosphérique récemment recyclé, et le procédé n'introduit pas de nouveau CO_2 dans le cycle du carbone. Mais quelles sont les émissions associées à la production de la culture à partir de laquelle le biocarburant est fabriqué? Quelle quantité d'énergie faut-il pour transporter, traiter et finalement livrer la matière première et le produit final?

Les répercussions potentielles de ces pratiques sont encore plus compliquées. Par exemple, les terres agricoles sur lesquelles on plante des graminées ou des arbres stockent du carbone dans le sol, tout en absorbant le CO_2 de l'atmosphère. De même, les cultures destinées à la production de biocarburants permettent de réduire les émissions de CO_2 provenant de la combustion des combustibles fossiles. Les terres ainsi détournées de leur vocation agricole dans une région seront-elles remplacées par de nouvelles terres cultivées ailleurs? Quelles émissions généreront-elles à cet endroit?

Les émissions de GES ne peuvent être quantifiées et réduites de façon efficace que si l'on prend en compte toutes les émissions d'un système agricole. Autrement dit, il faut considérer les exploitations agricoles comme des écosystèmes et évaluer tous les processus qui s'y déroulent.

Les modèles s'appuient sur une perspective écosystémique

Étant donné le grand nombre de procédés agricoles qui émettent des GES, de leurs interactions et de la diversité des exploitations agricoles, comment peut-on estimer les émissions nettes de ces écosystèmes? Comment peut-on prendre en compte toutes les connaissances dont on dispose et intégrer le tout sans s'empêtrer dans les détails ou se perdre en conjectures? La seule approche possible est probablement l'élaboration de modèles mathématiques. Ils peuvent être très simples ou d'une grande complexité – il peut s'agir de calculs *rudimentaires* griffonnés à la main ou de logiciels évolués mis au point par des équipes de scientifiques et de programmeurs.

Les modèles prennent en compte les processus pertinents de l'ensemble d'un écosystème, les intègrent et estiment les flux nets de GES. Il ne faut cependant pas en conclure que les modèles procurent invariablement la bonne réponse. En effet, les équations ne sont souvent que des généralisations reposant sur des hypothèses de base, voire des spéculations. Les modèles s'appuient toutefois sur une perspective écosystémique des émissions et exigent donc une certaine discipline. Ils ne tolèrent pas le réductionnisme de certains scientifiques.

Les modèles comportent d'autres avantages. Ils constituent une sorte de banque de données centrale permettant d'emmagasiner et de diffuser les résultats de la recherche. En l'absence de modèle, les données sur la séquestration du carbone dans le sol et les flux de GES dans les systèmes agricoles, pour ne prendre qu'un exemple, seraient consignées dans des piles de documents qui se retrouveraient rapidement sur les tablettes poussiéreuses d'une bibliothèque et ne retiendraient l'attention de personne. Pour être utiles, les données doivent participer, d'une façon ou d'une autre, à l'avancement de notre compréhension des phénomènes étudiés.

Comme on l'explique au chapitre sur la quantification des échanges de GES, les modèles ne sont qu'un canevas dans lequel des données doivent être introduites. Ils offrent un cadre de travail pour l'amélioration de nos connaissances. Dans le cas des flux de GES, l'acquisition de nouvelles données permet d'ajuster et d'améliorer les algorithmes et les hypothèses, pour lentement enrichir nos connaissances rudimentaires. Pour y parvenir, il faut évidemment faire preuve de discipline et consigner de façon méticuleuse les données accumulées dans une base de données ou un autre outil adéquat.

Le recours aux modèles présente un autre avantage. Il nous permet de mettre au jour les domaines où nos connaissances scientifiques sont les plus pauvres, c'est-à-dire de déterminer les sujets que nous comprenons le moins bien et sur lesquels la recherche doit donc s'orienter. Sans ce genre d'outil mettant en lumière les zones grises, la recherche scientifique peut parfois mettre trop l'accent sur les domaines déjà bien connus.

Modèles statiques et modèles dynamiques

Comme on l'a déjà mentionné dans un autre chapitre, on consacre de plus en plus d'efforts à l'élaboration de modèles permettant de prédire les émissions de GES des exploitations agricoles. Bien que peu d'entre eux prennent en compte de façon exhaustive tous les aspects d'un système agricole, un grand nombre ont néanmoins commencé à examiner les *systèmes*, plutôt que leurs éléments ou procédés distincts.

Les divers modèles et démarches permettant l'étude d'un système global peuvent être rangés dans deux grandes catégories : les modèles statiques et les modèles dynamiques. Les modèles statiques prédisent les émissions nettes cumulatives dans un intervalle de temps donné, généralement une année ou une saison agricole. Les modèles dynamiques sont plus complexes; ils prennent en compte

l'évolution dans le temps, en considérant les événements du passé et l'avenir, et prédisent comment les émissions nettes varieront en réponse à une pratique ou à un facteur externe.

Prenons par exemple la réponse de l'écosystème à l'adoption d'une pratique de culture sans labour. Le modèle statique, reposant sur des équations ou des coefficients simples, projetterait les fluctuations annuelles nettes des stocks de carbone du sol et l'émission annuelle moyenne de N_2O. Le modèle dynamique permet d'analyser l'accumulation du carbone dans le sol sur plusieurs décennies, et montrer que le taux d'accumulation change avec le temps pour éventuellement se rapprocher de zéro. Un modèle dynamique parfaitement au point pourrait également prendre en compte les changements à venir au chapitre du climat ou d'autres facteurs externes. Pour l'heure, il existe peu de modèles dynamiques, voire aucun, capables de mesurer les émissions nettes de tous les GES d'un écosystème agricole entier – mais leur élaboration demeure un objectif important de la recherche.

Le modèle statique

L'exemple qui suit est celui d'un modèle statique permettant de prévoir les émissions de GES des exploitations agricoles. En 2007, ce modèle a été rendu public par Agriculture et Agroalimentaire Canada et une nouvelle version (*Holos*) était en cours d'élaboration.

GHGFarm

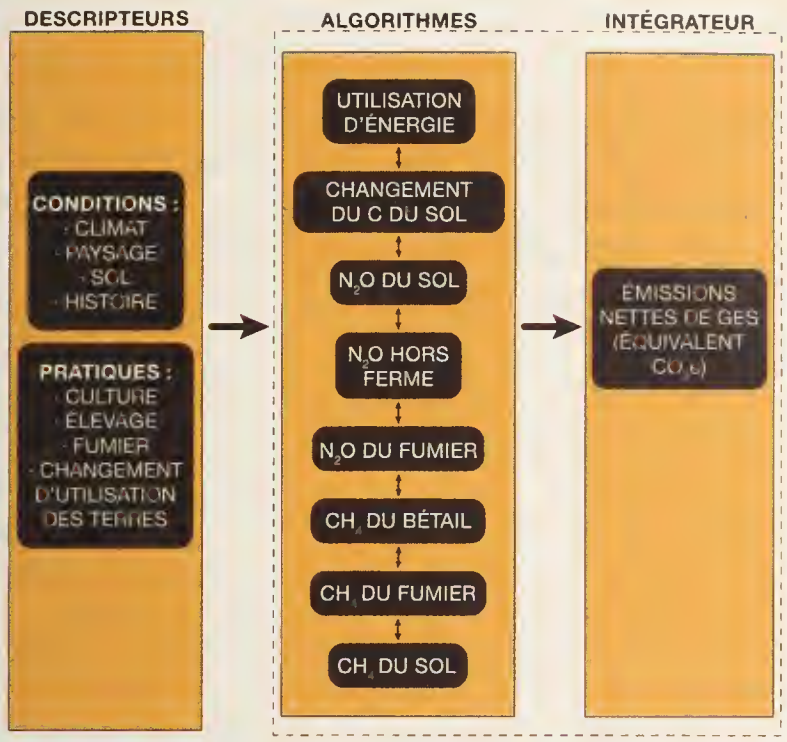
Un modèle simple, le logiciel GHGFarm, a été mis au point pour permettre à ses utilisateurs d'estimer les émissions nettes de GES des fermes canadiennes. Le modèle repose sur deux types de données d'entrée, comme on peut le voir à la figure 47 :

- Les *pratiques* de gestion choisies par le producteur, qui comprennent des variables telles que le choix des plantes cultivées, les quantités d'engrais appliquées, les techniques de travail du sol, les pratiques en matière d'alimentation du bétail et les systèmes de gestion du fumier
- *Les conditions qui règnent sur la ferme*, sur lesquelles le producteur n'a aucun contrôle, qui comprennent des variables telles que le type de sol, la température et les précipitations.

Le modèle estime les effets de ces variables sur les trois GES d'intérêt – le CO_2, le CH_4 et le N_2O – à l'aide d'équations simples reposant sur des algorithmes qui font l'unanimité à l'échelle mondiale, mais modifiés pour prendre en compte les conditions et pratiques propres au Canada, fondées sur les résultats de récents travaux de recherche.

FIGURE 47

Un modèle simple pour estimer les émissions nettes de l'ensemble d'une exploitation agricole



L'utilisateur fait un portrait de la ferme étudiée en décrivant les conditions qui y règnent (facteurs sur lesquels le producteur n'a pas de contrôle) et les pratiques agricoles qui y sont utilisées (choix faits par le producteur). Ces données d'entrée sont alors intégrées dans des équations ou des algorithmes qui estiment les émissions associées aux diverses conditions et pratiques de l'exploitation agricole. Les résultats de ces calculs sont ensuite intégrés pour obtenir une seule estimation des émissions nettes de toute la ferme.

Ce modèle pourrait avoir deux applications. La première serait de permettre aux producteurs, aux décideurs, aux scientifiques et aux autres utilisateurs d'estimer les émissions nettes actuelles d'un agroécosystème donné (généralement une exploitation agricole commerciale ou un petit groupe de fermes étroitement reliées). La deuxième application – plus utile celle-là – serait de permettre aux utilisateurs du modèle d'explorer les possibilités de réduction des émissions. Ils pourraient poser des questions du type *Qu'est-ce qui se produirait si...* Dans ce cas, on calcule les émissions actuelles qui servent de point de référence, et on y compare les résultats obtenus pour divers scénarios de changements de pratiques. Que se produirait-il si on modifiait l'alimentation du bétail ou si on gérait le fumier différemment? Que se produirait-il si on réduisait l'intensité du travail du sol ou si on cessait d'exploiter certaines terres? Ces options peuvent ensuite être comparées entre elles, les émissions nettes à l'échelle de toute la ferme résultant de chaque changement servant de critère pour choisir la combinaison optimale de pratiques.

Les résultats obtenus grâce à ce modèle ne sont pas dénués d'incertitude; dans de nombreux cas, le degré d'incertitude dépasse la différence entre les résultats obtenus pour les divers scénarios de gestion, ce qui représente évidemment un obstacle au choix de la meilleure option. Toutefois, le processus ayant mené à l'élaboration du modèle et à son application à des exploitations agricoles réelles nous a beaucoup appris sur la perspective écosystémique des fermes et sur les moyens de s'assurer que tous les aspects de ces exploitations et toutes leurs sources sont pris en compte dans le calcul des émissions nettes de GES des agroécosystèmes. Le modèle GHGFarm sera peut-être plus utile à titre d'outil de communication et d'éducation que pour obtenir des prévisions défendables.

Le modèle dynamique

Le paragraphe qui suit décrit un modèle dynamique proposé pour prédire les émissions de GES des exploitations agricoles.

La ferme virtuelle

Pour estimer de façon fiable les émissions de GES provenant des fermes, on doit prendre en compte le fait que les émissions de CO_2, de CH_4 et de N_2O varient avec le temps et qu'elles sont modifiées par les activités humaines et par la nature. Pour comprendre comment les émissions varient dans le temps, nous devons aussi comprendre le cycle de leurs éléments – c'est-à-dire le carbone et l'azote – dans les agroécosystèmes.

En 2008, un modèle simple représentant l'évolution d'un écosystème agricole en fonction du temps, conçu pour estimer les émissions nettes de GES en fonction du temps, était en cours de développement à Agriculture et Agroalimentaire Canada. Le modèle d'écosystème comporte six composantes principales : la végétation, les brise-vent, les cultures, le sol, le bétail et le fumier. Le modèle suppose que la réduction des émissions peut être attribuée à trois grands facteurs :

- gestion de la ferme ou activités agricoles (conditions perturbées),
- flux de carbone et d'azote dans l'écosystème (conditions non perturbées),
- L'interaction des deux premiers, en ce qu'ils entraînent des changements des stocks de carbone et d'azote dans chaque élément de l'écosystème.

Des avantages qui dépassent l'échelle de l'exploitation agricole

En élaborant des modèles s'appuyant sur une perspective écosystémique pour estimer les émissions nettes de GES provenant des exploitations agricoles, nous améliorerons notre capacité à atténuer les changements climatiques. Mais ces modèles présentent d'autres avantages : l'estimation des émissions des GES pourrait permettre une mesure sensible de la santé des écosystèmes – une façon d'évaluer l'état des exploitations agricoles et des autres écosystèmes. Presque invariablement, les émissions élevées de carbone et d'azote sont le signe d'une certaine inefficacité écologique dans l'utilisation de l'énergie, du carbone ou de

l'azote. Par exemple, si le N_2O est rejeté trop rapidement, c'est probablement que le cycle de l'azote est interrompu. Si les pertes de CO_2 sont trop importantes, c'est que les stocks de carbone du sol sont en train de s'épuiser ou que de l'énergie est consommée inutilement. Si les émissions de CH_4 sont excessives, c'est peut-être que le régime alimentaire des bovins n'est pas efficace et que l'énergie provenant de la photosynthèse n'est pas exploitée de façon optimale. Les GES sont donc des biomarqueurs – c'est-à-dire des signes biologiques du mauvais état de santé des écosystèmes – mettant en lumière les possibilités d'amélioration en matière de gestion pour rendre les écosystèmes plus robustes, plus efficients et plus permanents. De tels signes biologiques pourraient être d'une grande utilité dans les systèmes agricoles, qui font l'objet de manipulations intensives et qui subissent un stress croissant pour répondre aux demandes d'une population en pleine croissance.

Les méthodes élaborées pour étudier les émissions de GES des écosystèmes peuvent également être appliquées à d'autres problèmes environnementaux. Les modèles qui projettent les émissions de GES sont nécessairement élaborés à partir des flux d'énergie, de carbone et d'azote dans les écosystèmes. Pour prévoir les émissions de GES d'un écosystème, un modèle doit donc simuler les cycles de l'énergie, du carbone et de l'azote dans cet écosystème et les mettre en relation avec les cycles plus vastes des milieux environnants. Ces cycles sont au cœur d'autres préoccupations d'ordre écologique : la qualité de l'eau et des aliments, les autres sources d'énergie de remplacement ainsi que les émissions de polluants atmosphériques, comme l'ammoniac. Ils ont aussi des répercussions sur des aspects sociaux plus vastes, tels que la vitalité des collectivités rurales, la biodiversité et les habitats fauniques.

Il existe probablement d'autres questions que nous ne pouvons pas encore entrevoir – et qui ne se poseront peut-être pas avant des années ou des décennies – et auxquelles nous ne pourrons répondre que si nous comprenons la façon dont l'énergie, le carbone et les nutriments circulent dans les écosystèmes et interagissent entre eux. Les écosystèmes évoluent, et ce, à une vitesse peut-être plus rapide que celle de notre capacité de les comprendre. Le principal avantage de la modélisation des émissions de GES ne sera peut-être pas de nous permettre de les réduire. La modélisation nous permettra peut-être simplement de mieux comprendre nos écosystèmes fragiles et de concevoir, à partir de notre connaissance approfondie des processus écologiques, des solutions éclairées pour faire face à la détresse écologique qui nous attend.

La réduction des émissions de GES n'est peut-être donc pas le but ultime de la modélisation des écosystèmes; ce n'est qu'un objectif intermédiaire et temporaire. La question des GES n'est qu'un cas type sensible et opportun pour la modélisation écosystémique. L'objectif à long terme est d'acquérir une compréhension suffisante de nos écosystèmes et d'en avoir une description suffisamment succincte pour pouvoir discuter avec sagesse, lucidité et clairvoyance de n'importe lequel des stress environnementaux à venir. Étant donné la vitesse et l'imprévisibilité des changements à l'échelle mondiale, ces stress sont inévitables.

LECTURES COMPLÉMENTAIRES

Evans, F. C., « Ecosystem as the basic unit in ecology », *Science*, 1956, vol. 123, p. 1127-1128.

Janzen, H.H., D.A. Angers et coll., « A proposed approach to estimate and reduce net greenhouse gas emissions from whole farms », *Revue canadienne de la science du sol*, 2006, vol. 86, p. 401–418.

O'Neill, R.V. et J.R. Kahn, « Homo economus as a keystone species », *Bioscience*, 2000, vol. 50, p. 333–337.

Palmer, M.A., E.S. Bernhardt et coll., « Ecological science and sustainability for the 21st century », *Frontiers in Ecology and Environment*, 2005, vol. 3, p. 4–11.

Van Dyne, G.M., « Implementing the Ecosystem Concept in Training in the Natural Resource Sciences », p. 327–367 dans G.M. Van Dyne (éd.), *The Ecosystem concept in natural resource management.*

Trouver des solutions gagnante

LIENS ENTRE LES MESURES D'ATTÉNUATION DES GES ET LES AUTRES ÉCOSERVICES

Les écoservices – un concept en émergence

Jusqu'à récemment, lorsque les écologistes voulaient étudier des écosystèmes, ils partaient à la recherche de lieux dont le sol n'avait jamais été foulé par l'homme. Les humains étaient considérés par les écologistes comme une espèce envahissante. Pour étudier le comportement de la nature, les écologistes sont donc partis à l'assaut des dernières parcelles de terres jugées *naturelles*.

De nos jours, de plus en plus d'écologistes se rendent à l'évidence qu'il ne reste que bien peu de régions « vierges ». Pour le meilleur ou pour le pire, les humains font partie de la plupart des écosystèmes. Nous en sommes même souvent la *clé de voûte*, c'est-à-dire l'espèce dominante, car nous maîtrisons notre environnement et décidons quelles espèces peuvent survivre en notre présence.

Cette perspective a donné naissance à un nouveau concept : les *écoservices*. Comme le disait un chercheur, les écoservices sont « les conditions et les processus par lesquels les écosystèmes naturels [...] assurent le maintien et le développement de la vie humaine[1] » . Les écoservices remplissent une multitude de fonctions naturelles : la filtration des impuretés présentes dans l'eau, l'absorption du CO_2 excédentaire dans l'atmosphère et la survie des diverses formes de vie, par exemple. Bien que le concept d'écosystème ait été élaboré à l'origine pour décrire les écosystèmes naturels, il peut s'appliquer également aux terres agricoles dont la gestion sert à produire le plus d'avantages possibles pour l'humain. En général, ces avantages sont perçus comme étant des produits de la ferme qui peuvent être vendus : aliments, fibres et biocarburants. Comme tous les écosystèmes, cependant, les exploitations agricoles offrent aussi des services importants qui ne sont pas évidents à première vue. Comme le montre le tableau 7, les fermes servent de filtres environnementaux, endroits où l'on peut éliminer proprement des déchets non désirés, d'habitat pour la faune et les humains et de lieux d'attraits esthétiques. Tous ces écoservices plus discrets méritent également notre attention.

[1] *Daily, G.C., « Nature's Services – Societal Dependence on Natural Ecosystems », Island Press: Washington D.C., 1997.*

TABLEAU 7

Liste partielle des écoservices offerts par les fermes canadiennes

FONCTIONS PHYSIQUES	FONCTIONS SOCIALES	FONCTIONS ENVIRONNEMENTALES
• Aliments	• Subsistance	• Filtration de l'eau
• Fibres	• Espace vital	• Épuration de l'air
• Carburants	• Loisirs	• Dépôt de déchets
	• Esthétique	• Habitat faunique
		• Conservation des ressources génétiques
		• Atténuation des GES

Un important écoservices des fermes – dont nous avons déjà discuté – est leur contribution à la diminution des émissions de GES. Bien qu'elles soient généralement des *sources* nettes de GES – notamment de CH_4 et de N_2O– les fermes peuvent aussi devenir des *absorbeurs* nets de GES en absorbant le CO_2 présent dans l'air et en séquestrant ce carbone dans le sol et les plantes. La peur grandissante de changements climatiques néfastes a fait de la réduction des GES d'origine agricole un objectif qu'il est de plus en plus urgent d'atteindre. Toutefois, si un producteur agricole dresse un inventaire des écoservices potentiels de sa ferme et qu'il les organise en fonction de leur importance, il ne classera probablement pas la réduction des GES au premier rang. En effet, il est rare que des pratiques permettant de réduire les GES soient adoptées si elles ne favorisent pas également d'autres services. L'élaboration et la promotion de mesures d'atténuation des GES ne seraient donc qu'un exercice agréable sans portée pratique si elles ne prenaient pas en compte ces autres écoservices, souvent prioritaires.

Trouver des solutions gagnantes

Comment reconnaître l'existence des autres écoservices et en tenir compte lorsque vient le moment de choisir des stratégies de réduction des GES? La solution évidente consiste à chercher des options gagnantes pour toutes les parties – c'est-à-dire des pratiques qui réduisent les émissions de GES *et* favorisent d'autres services. La culture sans labour en est un exemple. De nombreuses études ont montré que la réduction du travail du sol peut augmenter les stocks de carbone du sol, du moins temporairement et ainsi absorber le CO_2 présent dans l'air. Cette mesure diminue aussi les émissions provenant de la combustion de combustibles fossiles. Ce faisant, elle peut contribuer à d'autres écoservices qui n'ont rien à voir avec la réduction des GES : amélioration du revenu des producteurs grâce à la réduction des coûts, conservation de la qualité du sol en évitant de le perturber, amélioration des habitats de nidification des oiseaux migrateurs et amélioration de la qualité de l'air grâce à la réduction de la poussière transportée par les tempêtes de vent. En réalité, c'est probablement grâce à tous ces autres avantages que la réduction du travail du sol est devenue une pratique bien acceptée à l'échelle mondiale.

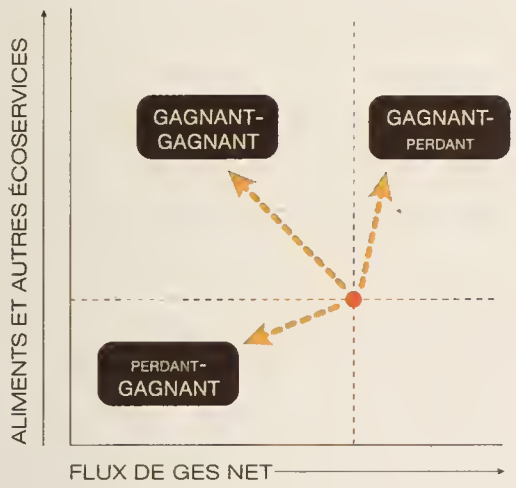
Ces solutions gagnantes sont les mesures idéales d'atténuation des GES. Elles pourraient même être les seules susceptibles d'être unanimement acceptées. Malheureusement, peu de mesures sont totalement avantageuses pour toutes les parties. La plupart exigent certains sacrifices ou comportent certains coûts à un moment ou à un autre au cours de leur mise en œuvre. Même la culture sans labour n'a pas uniquement des effets bénéfiques sur tous les écoservices. Par exemple, elle peut parfois entraîner un lessivage accru des pesticides qui altèrent la qualité de l'eau. Dans certaines régions, elle peut limiter le rendement des cultures et par conséquent la production alimentaire.

Grand gagnant, petit perdant

Comme l'illustre la figure 48, les effets positifs et négatifs potentiels exigent des compromis – c'est-à-dire qu'il faut faire des choix qui vont améliorer un écoservice en en sacrifiant un autre. La solution est donc de trouver des mesures qui permettent de gagner gros en perdant peu. Sommes-nous prêts à recommander une pratique qui réduit efficacement les émissions de GES (gain important), mais qui diminue le rendement agricole (perte modeste)? À l'inverse, pourrions-nous mettre de l'avant une pratique qui provoquerait une légère élévation des émissions de CH_4 (perte modeste), tout en augmentant de façon spectaculaire la production laitière (gain important)? Par contre, si nous prenons en compte plus de deux écoservices dans ce type d'équation, les questions deviennent très complexes. Ainsi, supposons que nous incluons dans notre analyse des compromis également la qualité de l'eau, la valeur esthétique et l'habitat faunique. Comment alors choisir la meilleure option?

FIGURE 48

Compromis entre les émissions de gaz à effet de serre et les écoservices offerts par les exploitations agricoles



Ce diagramme illustre les relations potentielles entre la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) et l'augmentation de la production des aliments. Idéalement, nous choisirions toujours des options « GAGNANT-GAGNANT ». Serions-nous prêts à accepter des solutions perdant-GAGNANT (petit sacrifice sur le plan de la production des aliments pour un gain important au chapitre de l'atténuation des GES) ou des solutions GAGNANT-perdant (petit sacrifice sur le plan de l'atténuation des GES pour un gain important en matière de production des aliments)? Chaque fois qu'on ajoute un écoservice à ce type d'équation, le problème prend une nouvelle dimension, et les décisions à prendre deviennent plus complexes.

Source : D'après Janzen. 2007. (Le concept « GAGNANT-perdant » a été proposé par DeFries et coll., 2004)

La situation devient encore plus complexe si on prend en compte les réactions en chaîne d'un écosystème à l'autre. Une mesure qui permet un gain important pour un service dans un écosystème donné peut mettre en péril les services d'un autre écosystème, parfois très éloigné. Par exemple, la conversion de terres agricoles en prairies peut réduire de façon spectaculaire les émissions de GES en séquestrant du carbone et en diminuant les émissions provenant des intrants. Là où cette mesure est adoptée, elle est extrêmement efficace pour réduire les émissions, ce qui représente une contribution certaine au chapitre du service qui consiste à neutraliser les émissions de GES. Il faut cependant se demander si la productivité perdue sur cette terre sera remplacée par une augmentation de la production ailleurs; le cas échéant, il pourrait être nécessaire, par exemple, de brûler une parcelle de forêt, ce qui se traduirait par la perte d'écoservices à cet endroit.

Le choix des meilleures pratiques ne se borne pas à déterminer quelles pratiques réduisent les émissions ou produisent un avantage économique immédiat. Nous devrons donc peut-être adopter une approche plus globale et trouver des moyens de comprendre et de quantifier les divers services offerts par les écosystèmes agricoles. Il faudra peut-être aussi trouver de nouvelles façons de quantifier

les gains réalisés en matière de réduction des émissions. Nous pourrions, par exemple, mettre au point une méthode pour comparer les pratiques en termes d'émissions par unité de production au lieu de simplement comparer les données sur les émissions. Quelle que soit l'approche que nous retiendrons, nous devrons comprendre tous les services associés aux systèmes agricoles et comment ils sont interreliés par la multitude de processus au sein de l'écosystème. De plus en plus, les scientifiques adopteront une perspective écosystémique des exploitations agricoles, et les décideurs tenteront de trouver des moyens de valoriser tous les services qu'elles offrent.

Les gaz à effet serre comme indicateurs du rendement des écosystèmes

La mesure et la compréhension des flux de GES sont importantes non seulement pour trouver des moyens de réduire les émissions, mais aussi pour évaluer le rendement des écosystèmes. Puisque les gaz à effets de serre sont inextricablement liés aux flux de carbone, de nutriments et d'énergie dans tout l'écosystème, les GES pourraient donc permettre d'évaluer l'état de santé d'un écosystème.

Il semble évident que l'on aura besoin de tels indicateurs, car la biosphère se transforme, et peut-être même à une vitesse sans précédent. Au cours des prochaines décennies, il est possible que la température de la Terre s'élève, que les précipitations deviennent imprévisibles et que la concentration de CO_2 dans l'air augmente. D'autres facteurs physiques – la présence d'aérosols dans l'atmosphère et le changement des propriétés réfléchissantes du paysage – contribuent aussi à ces changements, ce qui augmente le niveau d'incertitude.

Les changements liés à des facteurs sociaux sont peut-être plus puissants encore que les changements physiques. Ces changements sont stimulés par la croissance de la population mondiale et notre capacité accrue d'aménager la terre, les océans et l'air qui nous entourent. Même s'il est possible que la population mondiale atteigne un état d'équilibre d'ici à 2050, elle pourrait augmenter de presque 50 % dans l'intervalle. Ceci pourrait imposer d'autres stress sur les terres agricoles à mesure qu'augmente la demande alimentaire.

L'augmentation de la demande est jumelée à une diminution de nos ressources qui est encore plus alarmante. En effet, il reste peu de nouvelles terres productives à cultiver, ce qui signifie qu'on attendra un rendement plus élevé des terres déjà cultivées. Or, l'eau nécessaire à l'irrigation, qui a joué un rôle tellement important dans l'accroissement des rendements dans le passé, pourrait être réservée à d'autres fins. En outre, nos réserves d'énergie bon marché sont en train de s'épuiser, et il faut aussi s'attendre à voir apparaître d'autres contraintes que nous ne pouvons pas encore prévoir. En raison de l'accroissement de la demande et de l'épuisement des ressources, nous nous dirigeons inévitablement vers ce que E. O. Wilson appelle un goulot d'étranglement.

De toute évidence, à la lumière des stress à venir, nous aurons besoin de marqueurs nous permettant d'évaluer l'état de nos écosystèmes. Tiennent-ils le coup ou sont-ils en train de s'épuiser? Comment pourrons-nous le savoir si nous ne disposons pas d'indicateurs fiables? Le plus grand mérite de l'étude des GES pourrait être de nous permettre de répondre à ces questions. En effet, les GES sont sensibles aux flux de nutriments et d'énergie dans les écosystèmes. Ainsi, les émissions excédentaires de CO_2 nous indiquent que les stocks de carbone dans le sol s'épuisent ou que l'énergie fossile est gaspillée. Les émissions élevées de CH_4 pourraient être le signe que l'énergie solaire emmagasinée dans les aliments pour animaux à base de plantes n'est pas utilisée de façon efficiente. La présence de N_2O pourrait indiquer que les flux d'azote ne sont pas couplés. En étudiant ces flux, nous apprenons non seulement la nature de ces émissions et de leur contribution aux changements climatiques, mais aussi certains effets de ces changements sur les écoservices : qualité du sol et de l'eau, biodiversité, esthétique, entre autres.

Dans cette perspective, le simple fait de faire des inventaires, de compter des gigatonnes d'émissions ne suffit plus. Il s'agit plutôt de savoir si nos écosystèmes sont permanents ou durables au bout du compte. Cela nous ramène à la question fondamentale, formulée par Berrien Moore III en 2002 : « Le ciel, la terre et les océans nous parlent. Sommes-nous à l'écoute? »

LECTURES COMPLÉMENTAIRES

Cohen, J.E., « Human population grows up », *Scientific American*, vol. 293, p. 48-54.

Daily, G.C.E., *Nature's Services–Societal Dependence on Natural Ecosystems*, Island Press, Washington D.C., 1997.

DeFries, R.S., J.A. Foley et G.P. Asner, « Land-use choices: balancing human needs and ecosystem function », *Frontiers in Ecology & Environment*, vol. 2, p. 249-257.

FAO, *Agriculture mondiale : horizon 2015-2030*, Earthscan Publications Ltd., London, 2003.

(Rapport abrégé)

Green, R.E., S.J. Cornell, J.P.W. Scharlemann et A. Balmford, « Farming and the fate of wild nature », *Science*, 2005, vol. 307, p. 550-555.

Janzen, H.H., « Greenhouse gases as clues to permanence of farmlands », *Conservation Biology*, 2007, vol. 21, p. 668-674.

MEA, *Ecosystems and human well-being: Synthesis*, Island Press, Washington D.C., 2005.

Smil, V., *The earth's biosphere: Evolution, dynamics, and change*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2002.

von Kaufmann, R.R. et H. Fitzhugh, « The importance of livestock for the world's poor », p. 137-159, dans C. G. Scanes et J. A. Miranowski, éd., *Perspectives in world food and agriculture 2004*, Iowa State Press, Ames, Iowa, 2004.

Wilson, E.O., *The future of life*, Vintage Books, Random House Inc., New York, NY, 2002.

Les promesses des biocarburants

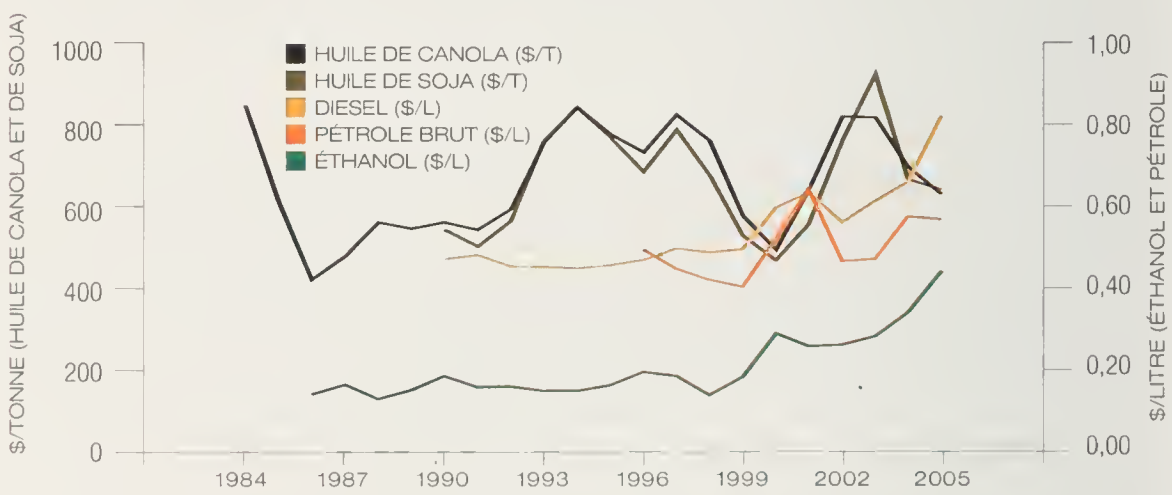
DES POSSIBILITÉS D'AVENIR ET DES DÉFIS

Vers la fin du XXe siècle, le monde entier a commencé à s'inquiéter sérieusement du déclin de nos réserves d'énergie et de l'accumulation de CO_2 dans notre atmosphère. La demande en énergie augmentait rapidement, ce qui s'est traduit par une élévation de son prix. Au même moment, l'éthanol (alcool éthylique) et le biodiesel devenaient des sources de carburant liquide de rechange, mais, à cette époque, leur coût de production dépassait celui des produits pétroliers comparables.

Au cours des récentes années, les aspects économiques de la production de biocarburants se sont améliorés. Comme le montre la figure 49, cette situation est surtout attribuable à la hausse du prix du pétrole et, en partie, aux allégements fiscaux et aux subventions accordés pour encourager la production de biocarburants.

FIGURE 49

PRIX DE L'HUILE DE CANOLA ET DE L'HUILE DE SOYA COMPARATIVEMENT AU PRIX DU PÉTROLE BRUT ET DU DIESEL (1984–2005)



Source : Smith et coll. 2008

Si les biocarburants ont suscité un intérêt croissant chez les producteurs et les consommateurs, c'est que, contrairement aux combustibles fossiles, comme le pétrole et le charbon, ils sont *renouvelables*. En d'autres termes, ils peuvent générer des quantités d'énergie électrique, thermique ou mécanique qui sont au moins équivalentes à celles utilisées pour produire les organismes vivants et fabriquer les sous-produits qui entrent dans leur composition. De plus, fait important, les plantes utilisées pour produire des biocarburants liquides absorbent du CO_2 de l'atmosphère pendant leur croissance, ce qui compense une partie du CO_2 émis lorsque les biocarburants sont brûlés pour produire de l'énergie.

Bilan canadien en matière d'énergie renouvelable

L'approvisionnement énergétique primaire annuel du Canada s'élève à environ 11 exajoules (*exa* est un facteur de 10^{18}), et 17 % de cette énergie provient de sources renouvelables. La plus grande proportion de l'énergie renouvelable provient de l'eau (hydroélectricité) (11 %) et de la biomasse forestière (6 %).

La production de bioénergie renouvelable à partir des déchets agricoles et forestiers (auxquels il faut ajouter les déchets solides industriels et urbains ainsi que les biogaz d'égout), des cultures énergétiques, du vent et du soleil est en augmentation au Canada. L'industrie des pâtes et papiers et celle des produits forestiers recyclent la moitié de toute l'énergie qu'elles utilisent par la conversion de biomasse en électricité, en vapeur et en chaleur, alors que le bois de chauffage et les gaz d'enfouissement sont utilisés pour le chauffage des espaces résidentiels. L'utilisation des biocarburants dans le secteur canadien des transports présente un intérêt particulier, car ce secteur contribue dans une proportion d'environ 26 % aux émissions de CO_2 à l'échelle nationale, émissions qui réduisent aussi la qualité de l'air.

L'agriculture joue un rôle crucial

En remplaçant les combustibles fossiles par des biocarburants, on réduit les émissions nettes de carbone dans l'atmosphère. Le secteur agricole joue un rôle direct dans cette substitution, car ce sont des produits cultivés sur des fermes qui sont le principal ingrédient de nombreux systèmes de bioénergie, dont l'éthanol (grains et biomasse cellulosique), le biodiesel (graines oléagineuses), les biogaz (déchets) ainsi que l'énergie thermique et les biogaz (biomasse forestière).

TABLEAU 8

Sources de bioénergie et procédés de fabrication et d'utilisation de chaque source

SOURCES	SOURCES D'ALIMENTS	PROCESSUS	PRODUITS
Éthanol	Amidon (grains, sucre)	Fermentation	Éthanol et drêches de distillerie
Biodiesel	Huiles (animale et végétale)	Transestérification	Biodiesel, tourteau de protéines et glycérine
Biogaz	Matière organique	Digestion anaérobie	CH_4 et chaleur
Cellulose	Bois et paille	Hydrolyse et fermentation	Éthanol
Biomasse ligneuse	Bois	Combustion et gazéification	Électricité, chaleur et gaz synthétique

ÉNERGIE DE LA BIOMASSE

L'énergie tirée de la biomasse – énergie obtenue à partir du traitement de certains végétaux – est utilisée depuis des milliers d'années pour cuire les aliments et produire de la chaleur. Elle comblait une part importante des besoins humains en énergie avant la révolution industrielle. Depuis lors, les pays développés satisfont à la plupart de leurs besoins énergétiques en brûlant des combustibles fossiles facilement accessibles et peu coûteux, comme le charbon, le pétrole et le gaz naturel – ce qui n'est pas sans conséquences pour l'environnement.

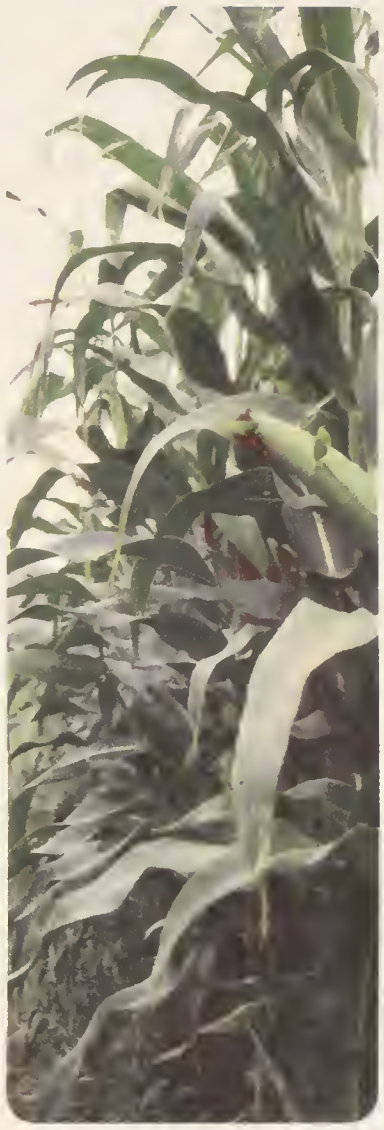
La biomasse est toujours la forme d'énergie prédominante dans la plupart des pays en développement, où elle représente plus du tiers de la consommation d'énergie primaire – bien que la consommation d'énergie fossile soit en croissance. L'Agence internationale de l'énergie prévoit que, d'ici 2020, la demande mondiale en énergie aura crû de 50 % par rapport à 2006.

La combustion directe est le moyen le moins coûteux, le plus simple et le plus utilisé pour obtenir de l'énergie à partir de la biomasse. Mais on peut aussi avoir recours à la pyrolyse, un procédé thermochimique qui convertit la biomasse en biohuile, en charbon ou en méthanol en la soumettant à des températures d'environ 1 023 °C en l'absence d'oxygène. La pyrolyse permet de produire des carburants énergétiques qui offrent un bon rapport charge d'alimentation-carburant, ce qui en fait un procédé efficace pour la conversion de la biomasse en pétrole brut pouvant être utilisé dans les moteurs et les turbines.

Les scientifiques ont estimé que, en 2007, les résidus forestiers et agricoles mondiaux suffiraient à combler environ un treizième de la demande mondiale en énergie. Les estimations quant à l'utilisation potentielle de la biomasse pour satisfaire aux besoins énergétiques mondiaux dans l'avenir varient énormément – les estimations les plus généreuses étant quatre fois plus élevées que les estimations les plus prudentes. Ces variations sont principalement attribuables à l'incertitude entourant deux paramètres, qui laisse place à l'interprétation : la disponibilité des terres et le rendement des cultures. Une étude plus récente a estimé que le potentiel de production de bioénergie à l'échelle mondiale à partir des résidus et des déchets agricoles et forestiers d'ici 2050 se situait entre 76 et 96 exajoules par année. La solution pour atteindre ce résultat réside dans l'optimisation des systèmes de production agricole de façon que la demande alimentaire puisse être satisfaite par l'utilisation de 50 à 75 % des terres cultivées à cet escient en 1998, le reste des terres devenant disponibles pour la production de cultures énergétiques.

Éthanol

L'éthanol est la principale source de bioénergie. Il est fabriqué par la fermentation et la distillation de sucres simples. Ces sucres peuvent provenir de la betterave à sucre et de la canne à sucre, de l'amidon modifié des grains céréaliers, de sources de cellulose comme les arbres, les graminées et les résidus de culture, des pommes de terre et de déchets d'origine animale.



Au Canada, l'éthanol est produit à partir de grains : le blé, dans l'ouest, ou le maïs, dans l'est. Le procédé est le suivant : les grains sont moulus pour obtenir de l'amidon – le constituant énergétique du grain. Cet amidon est soumis à une fermentation pour produire de l'éthanol, qui est ensuite distillé pour éliminer l'eau et les impuretés. Les sous-produits ont une teneur élevée en protéines et peuvent servir d'aliments pour le bétail. Lorsque la construction des usines canadiennes de transformation sera terminée, la production d'éthanol sera suffisante pour combler environ 2,1 % de la consommation d'essence automobile au pays.

Aux États-Unis, l'éthanol est principalement produit à partir du maïs. Environ 15 % de la production de maïs sert à fabriquer de l'éthanol, mais l'utilisation de ce biocarburant ne représente qu'une faible proportion (2,4 %) de la consommation d'essence. Les augmentations prévues de la production d'éthanol devraient permettre de satisfaire à environ 5 % de la consommation d'essence automobile.

Au Brésil, la production d'éthanol à partir de la canne à sucre fournit une proportion étonnante de 40 % du carburant utilisé au pays. Le coût de production de l'éthanol à partir de la canne à sucre au Brésil se compare à celui de sa production à partir du maïs aux États-Unis, mais la différence varie en fonction des fluctuations du prix des charges d'alimentation.

L'efficience de la production de l'éthanol dépend de nombreux facteurs : rendement des cultures, intrants énergétiques sous forme de carburants, quantités d'engrais et de pesticides utilisées, caractéristiques génétiques de l'espèce cultivée, pratiques culturales particulières et proportion de l'énergie consacrée aux coproduits comparativement à la proportion utilisée pour la fabrication du produit principal (biodiesel ou éthanol). Par exemple, la mouture sèche du maïs est privilégiée à la mouture humide parce qu'elle est plus efficace.

On peut aussi obtenir de l'éthanol à partir de la biomasse cellulosique, notamment le panic raide, ou de la biomasse forestière, comme des arbres à croissance rapide en courte rotation tels que le peuplier hybride et le saule. La technologie permettant l'utilisation de tels produits offre la possibilité de produire de l'éthanol à faible coût, mais elle en est encore au stade d'usine-pilote. Il reste toutefois de nombreux obstacles à surmonter avant d'obtenir une méthode exploitable sur le plan commercial.

CONVERTIR LA CELLULOSE EN COMBUSTIBLE

Les sucres utilisés pour produire l'éthanol peuvent provenir d'autres sources que les grains de blé ou de maïs. Une option prometteuse consiste à utiliser la cellulose, un composé organique présent en abondance sur la Terre. La conversion de la cellulose en sucres se fait normalement en trois étapes. La première étape est le prétraitement, pour rendre la matière plus accessible aux enzymes. La deuxième étape est l'hydrolyse enzymatique, où les cellulases interviennent pour accélérer la vitesse de la réaction biochimique et/ou l'hydrolyse thermique au cours de laquelle la cellulose est convertie en glucose. La troisième étape est la fermentation durant laquelle le glucose est converti en éthanol. La chaleur nécessaire à la distillation est produite par la combustion de la lignine qui compose les fibres végétales.

Biodiesel

Le biodiesel est produit à partir de l'huile animale ou végétale, comme l'huile de soya et l'huile à friture recyclée, ou de la graisse extraite des résidus animaux pendant la transformation des aliments. La transformation de ces produits en biodiesel, appelée *transestérification*, consiste à mélanger la graisse ou l'huile à du méthanol et à un catalyseur pour produire du biodiesel (ester méthylique) et de la glycérine. Les impuretés sont ensuite éliminées. La glycérine est un sous-produit qui se prête à de nombreuses applications commerciales, comme la fabrication de savon. Le biodiesel est un combustible intéressant parce qu'il n'est pas toxique, qu'il est biodégradable et qu'il ne contient pas de soufre ni d'hydrocarbures aromatiques (polluants atmosphériques).

En 2007, quelques usines seulement produisaient du biodiesel au Canada à partir de graisses animales ou de graisses jaunes (huiles récupérées des restaurants et d'autres sources). Elles en fabriquaient environ 0,09 gigalitre par année (une quantité relativement faible). Plusieurs nouvelles usines devraient voir le jour et permettre l'expansion de l'industrie du biodiesel. Pour l'heure, les ventes de biodiesel représentent environ 0,3 % des ventes totales de carburant diesel au Canada. Les États-Unis produisent actuellement environ le tiers de tout le biodiesel mondial, et ce pays prévoit presque tripler sa production d'ici 2008 en utilisant surtout l'huile de soya comme charge d'alimentation. Lorsqu'ils y seront parvenus, leur production devrait représenter environ 4 % de la consommation de diesel aux États-Unis. À l'heure actuelle, la production mondiale de biodiesel est surtout concentrée en Europe.

Biogaz

Le biogaz peut être produit par la digestion anaérobie du fumier et d'autres matières organiques. Des bactéries agissent pour convertir des substances organiques complexes en composés plus simples. Ce procédé libère du CH_4, du CO_2 et des quantités traces d'autres gaz. Une fois que le biogaz a été produit, on peut éliminer les gaz indésirables pour ne conserver que le CH_4 utile. Ce dernier peut remplacer des sources d'énergie non renouvelables, comme le gaz naturel et le propane, pour la cuisine et le chauffage résidentiel. Le méthane peut aussi être utilisé dans les moteurs à combustion interne pour générer de l'électricité et de la chaleur, mais le système est peu efficace s'il n'est utilisé que pour la production d'électricité.

Les types de digesteurs anaérobies vont des simples structures couvertes servant à l'entreposage du fumier aux bioréacteurs étanches chauffés et automatisés. De grands digesteurs anaérobies évolués existent déjà, surtout en Europe. On trouve quelques digesteurs en fonction au Canada, et la plupart utilisent le biogaz pour générer de l'électricité et de la chaleur. Ces systèmes sont continuellement améliorés grâce à de nouvelles technologies, à des bactéries anaérobies plus efficaces et à une meilleure composition des boues, ce qui rend leur installation de plus en plus rentable. L'effluent de ce système a une teneur élevée en fibres, et sa concentration en azote est supérieure à celle du fumier non traité, ce qui en fait un amendement ou un paillis qui peuvent être utilisés efficacement au champ.

Énergie produite par la combustion du bois

La combustion de bois est une source d'énergie utilisée depuis des siècles. La biomasse forestière à croissance rapide peut être utilisée seule ou en association avec le charbon pour produire de l'électricité. (La paille excédentaire issue de la production de cultures pourrait être utilisée de façon similaire.) L'industrie forestière canadienne utilise des déchets ligneux pour générer de la vapeur, de l'électricité et de la chaleur. La biomasse ligneuse peut aussi être gazéifiée pour obtenir un gaz synthétique qui peut remplacer le propane ou le gaz naturel.

Un bilan énergétique convaincant?

Pour que les biocarburants soient envisagés comme des substituts efficaces aux combustibles fossiles, ils doivent permettre d'obtenir un gain énergétique net, avoir un avantage du point de vue de l'environnement, être concurrentiels sur le plan économique et pouvoir être produits en grandes quantités sans réduire les réserves alimentaires. Pour déterminer si un biocarburant offre de réels avantages lorsqu'il remplace les combustibles fossiles, il faut procéder à une analyse détaillée de son cycle de vie.

Pour déterminer si les biocarburants offrent un gain énergétique net, on doit assimiler les fermes à des *économies insulaires* et déterminer l'énergie totale nécessaire à la *culture* de la matière première et de sa conversion en biocarburant. Pour calculer l'énergie consacrée à la culture des plantes à titre de charge d'alimentation destinée à la fabrication de biocarburants, il faut prendre en compte l'énergie utilisée pour les semences et leur traitement, la production de semences,

tout le travail au champ incluant la préparation du sol, le semis et la récolte, le chauffage et l'entretien des bâtiments, la production et l'épandage d'engrais et de pesticides ainsi que la fabrication des machines et de l'équipement nécessaires. Pour calculer l'énergie consacrée à la conversion des cultures en biocarburants, il faut prendre en compte le transport de la ferme vers l'usine de traitement ou de production de biocarburant et toutes les sources d'énergie mises à contribution dans les installations, y compris pour leur construction.

Depuis les années 1970 jusqu'à récemment, l'énergie nécessaire à la production du maïs et à sa conversion en éthanol était supérieure à l'énergie que renferme l'éthanol obtenu. Aujourd'hui, avec l'augmentation des rendements en maïs, la réduction des intrants énergétiques nécessaires à la production du maïs et l'augmentation de l'efficacité de la production industrielle de l'éthanol, l'éthanol de maïs peut maintenant fournir près de 25 % d'énergie de plus que celle qui est nécessaire à sa production. Toutefois, un bilan énergétique positif n'a pas été trouvé dans toutes les études. Le bilan positif est obtenu en allouant une partie de l'énergie nécessaire à la culture des grains et à la production de l'éthanol aux coproduits appelés drêches de distillerie et en supposant de plus faibles taux d'utilisation d'intrants pour la production du maïs. On a trouvé que l'éthanol issu du blé avait une efficacité énergétique de 6 % inférieure à l'éthanol de maïs.

Le bilan énergétique du biodiesel dépend également de la source de la charge d'alimentation. Celui du biodiesel provenant des huiles et des graisses recyclées sera évidemment très positif. Le biodiesel fabriqué à partir d'huiles de soya et de canola nouvellement produites génère environ deux fois plus d'énergie qu'il n'en faut pour produire et traiter ces huiles. Bien que la culture du canola nécessite plus d'énergie que celle du soya, son rendement en huile est supérieur à celui du soya, ce qui signifie que la quantité d'énergie obtenue des deux cultures par unité d'énergie utilisée est à peu près équivalente. Les gains réalisés au cours de la dernière décennie en matière d'efficacité sont attribuables à des cultures à plus haut rendement ainsi qu'à des améliorations des procédés industriels d'oléifaction et des procédés de transestérification qui permettent d'obtenir plus d'ester de méthyle et moins de glycérine.

De profonds effets sur l'agriculture

Le Canada compte environ 40 millions d'hectares de terres cultivées. Parmi les principales cultures utilisées pour produire des biocarburants, mentionnons le blé, le maïs-grain, le canola et le soya. Des terres doivent également être cultivées pour produire le fourrage, l'orge et l'avoine destinés à nourrir les bovins, les ovins, les porcins et d'autres animaux d'élevage. La production de biocarburants aura donc des effets sur les vastes populations canadiennes de bovins, de porcs et de volaille.

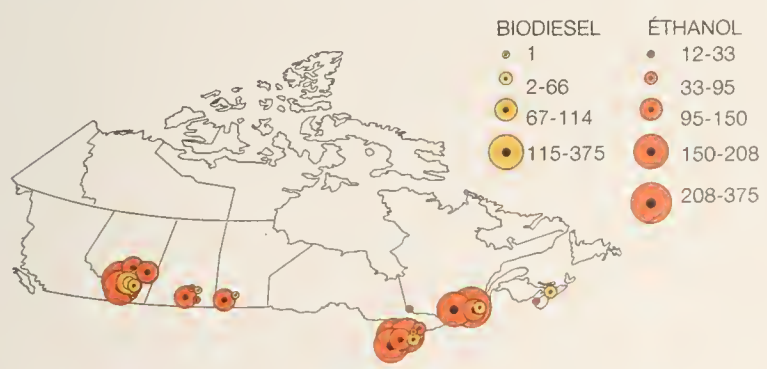
Parallèlement, la production de biocarburants en Amérique du Nord a poussé à la hausse la demande de céréales et d'oléagineux, ce qui a entraîné une augmentation des prix de ces produits. Du côté des producteurs de céréales

et d'oléagineux, l'augmentation des prix a fait croître les recettes de la culture, a donné lieu à une augmentation de la valeur de la ferme et a influé sur les décisions en matière de cultures. L'utilisation des terres changera alors que les producteurs se tourneront vers des cultures plus rentables. Dans le cas du maïs, ces décisions pourraient entraîner une augmentation de la monoculture et contribuer à l'érosion du sol. D'autres risques environnementaux augmenteront également, car le maïs a besoin de plus fortes doses d'engrais, d'herbicides et d'insecticides que la plupart des autres cultures. Des efforts additionnels de conservation du sol appliqués par les producteurs pourraient réduire, mais non éviter, les répercussions négatives de l'augmentation de la production végétale annuelle sur le sol, l'eau et la qualité de l'air.

Au delà des aspects politiques, économiques, énergétiques ou environnementaux, l'industrie des biocarburants soulève une question d'éthique : les terres agricoles devraient-elles être consacrées à la culture d'aliments pour les êtres humains ou à la production de carburants pour nos véhicules? Comme historiquement l'Amérique du Nord produisait des quantités de grain excédentaires, la production d'éthanol n'entraînera pas des carences alimentaires locales, mais provoquera une hausse des prix des aliments. À l'échelle mondiale, la production de biocarburants pourrait entraîner une réduction de l'aide alimentaire aux pays en développement et exacerber les famines. Manifestement, une évaluation complète des effets de la production de l'éthanol à partir de céréales nécessite une vision mondiale. Alors que la production d'éthanol à partir de céréales est une des nombreuses options permettant de gérer la crise énergétique, est-elle viable à long terme?

FIGURE 50

Distribution des usines actuelles (2007) et prévues (après 2007) de fabrication d'éthanol et de biodiesel au Canada



Source : Information supplémentaire et adaptée des données fournies par l'Association canadienne des carburants renouvelables, en ligne à l'adresse www.greenfuels.org/ (en anglais seulement), Klein, 2007 et présentations de nouvelles de l'Association.

Quelques producteurs ont investi dans la construction d'usines de traitement des biocarburants, mais la plupart des usines existantes sont de grande envergure et appartiennent à des entreprises de biocarburants bien établies qui les exploitent elles-mêmes. La proximité d'une usine de biocarburants incite donc les producteurs à cultiver les espèces utilisées par cette installation. Par exemple, la production d'éthanol à partir du blé dans l'Ouest canadien fait appel à des variétés de blé à teneur élevée en amidon, mais à faible teneur en protéines. Or, les conditions idéales à la culture de ces variétés ne sont pas nécessairement celles qui prévalent à proximité des usines. Avec le temps, les programmes d'amélioration génétique des cultures permettront la mise au point de lignées de blés et de maïs hybrides qui constitueront de meilleures charges d'alimentation pour les usines de biocarburants que les variétés disponibles à l'heure actuelle.

Par ailleurs, l'augmentation des prix des cultures se répercute sur le coût de l'alimentation du bétail. Ce phénomène revêt une importance particulière dans le cas du maïs et de l'orge qui sont des sources d'alimentation majeures pour l'industrie des productions animales. Certains sous-produits peu coûteux de la fabrication des biocarburants peuvent être utilisés dans l'élevage du bétail, mais on ignore encore la quantité exacte de ces sous-produits qu'il est possible de donner aux animaux sans nuire au rendement des élevages et à la qualité de la viande.

Réduire les émissions de GES

Les biocarburants sont fabriqués à partir de matière végétale fraîche. Le CO_2 émis lors de leur combustion provient donc de carbone recyclé, récemment absorbé de l'atmosphère et non de combustibles fossiles.

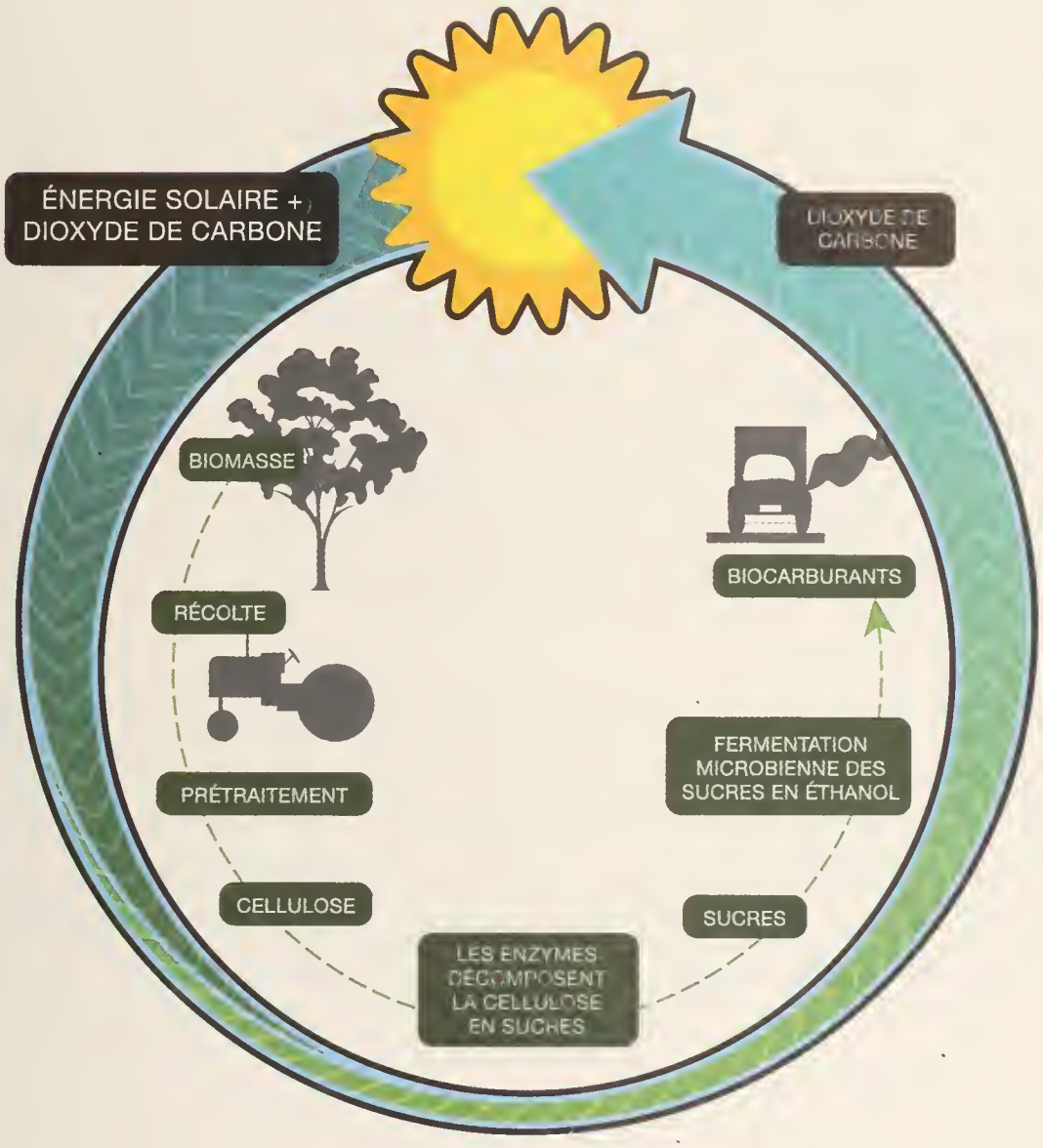
Des analyses récentes estiment que les émissions nettes de GES associées à la production et à la combustion de l'éthanol de maïs sont inférieures de 18 % à celles de l'essence classique, la plage d'incertitude se situant entre 36 % sous cette estimation moyenne et 29 % au dessus. Selon les travaux de recherche réalisés, les réductions potentielles des émissions pourraient varier selon différents facteurs tels que l'intensité du travail du sol et la quantité d'azote appliquée. Il faudra continuer à étudier le flux du carbone et de l'azote dans l'air, l'eau et le sol pour mieux comprendre comment produire des biocarburants présentant un bilan positif en matière d'émissions de GES.

Renforcer les collectivités rurales

En 2006, le Canada a octroyé des subventions commerciales pour la construction de nouvelles usines de traitement des biocarburants ainsi que pour appuyer la recherche et le développement technologique dans ce domaine. Elles comprennent un nouveau programme prévoyant la construction de cinq usines de traitement de l'éthanol qui porteront la production annuelle canadienne à 1,4 milliard de litres d'ici 2008. Ces usines produiront suffisamment d'éthanol pour que 35 % de toute l'essence utilisée au Canada contiennent 10 % d'éthanol.

FIGURE 51

APERÇU DU CYCLE DU CARBONE



L'Initiative des marchés de biocarburants pour les producteurs (IMBP), qui contribue à réduire les coûts engagés pour les infrastructures nécessaires à la fabrication de biocarburants, offre maintenant du financement aux producteurs agricoles pour la création et l'élargissement de leur capacité de production d'éthanol. Technologies du développement durable Canada (TDDC) a récemment accepté de financer quatre projets technologiques sur les biocarburants visant la fabrication d'éthanol à partir de matières cellulosiques et de graines de moutarde pour appuyer l'accélération de la recherche sur les biocarburants et les technologies connexes. Les travaux de recherche porteront sur les économies d'énergie potentielles qu'offrent les applications industrielles et commerciales des coproduits, sur la mise au point de technologies de fabrication améliorées ainsi que sur les moyens de mieux évaluer les coûts et les avantages environnementaux et sociaux de la production de biocarburants.

Les perspectives d'avenir pour les biocarburants au Canada

Le gouvernement du Canada s'est engagé à faire passer le contenu moyen de l'essence en combustibles renouvelables à 5 % d'ici 2010 et celui du carburant diesel et de l'huile à chauffage à 2 % d'ici 2012. Pour atteindre cet objectif, le gouvernement a alloué des ressources afin de soutenir le développement de l'industrie des combustibles renouvelables. Trois programmes sont dignes de mention : l'Initiative des marchés de biocarburants pour les producteurs (IMBP) , qui aide les fermiers à retenir les services de conseillers spécialisés dans les domaines techniques, financiers et de la planification des activités commerciales dans le but d'élaborer des projets d'entreprise et de réaliser des études de faisabilité ainsi que d'autres analyses nécessaires, le Programme d'innovation en matière de bioproduits agricoles (PIBA) qui vise à intégrer les ressources de manière à accroître la capacité de recherche en matière de bioproduits et de bioprocédés agricoles et l'Initiative pour un investissement écoagricole dans les biocarburants (IIEB) qui a permis à certaines usines de combustibles renouvelables situées sur des fermes de mettre en œuvre des plans de développement.

Le succès à long terme de l'industrie des combustibles renouvelables reposera sur de nombreux facteurs, dont le prix du pétrole, l'approvisionnement en produits agricoles nécessaires à leur production et leur coût de production. En 2007, le prix élevé du pétrole a été favorable à cette industrie sur le plan économique, mais les pénuries en produits agricoles (maïs, blé, soya et canola) ont fait augmenter le prix de la charge d'alimentation servant à fabriquer les combustibles renouvelables et, par conséquent, le coût de leur production.

LECTURES COMPLÉMENTAIRES

Farrell, A. E. et coll., « Ethanol can contribute to energy and environmental goals », *Science*, 2006, vol. 311, p. 506–508.

Hill, J., E. Nelson, D. Tilman, S. Polasky et D. Tiffany, « Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2006, vol. 103, p. 11206–11210.

Klein, K., D.G. LeRoy, « *The biofuel frenzy: what's in it for Canadian agriculture?* », Alberta Institute of Agrologists, 2007, Banff, Alberta, 44 p. En ligne à : http://www.aia.ab.ca/index.cfm/ci_id/2077/la_id/1/document/1/re_id/0 (en anglais seul.). Consulté le 30 octobre 2007.

Newlands, N. K., J. Foyle et L. L. Yang, « *Potential net reductions in greenhouse gas emissions from farm bioenergy production in Canada.* » ASABE Proceedings of the 4th World Congress of Computers in Agriculture and Natural Resources, 2006, p. 770–774. En ligne à : http://asae.frymulti.com/request.asp?JID=1&AID=21971&CID=canr2006&T=2 (en anglais seul.). Consulté le 30 octobre 2007.

Smith, E. G., H. H. Janzen et N. K. Newlands, « Energy balances of biodiesel production from soybean and canola in Canada », *Revue canadienne de phytotechnie*, 2008, vol. 87, p. 793-801.

Restaurer la qualité de l'air

1

POLITIQUES EN MATIÈRE DE MESURE ET DE RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE

Le changement du climat est un problème mondial qui aura des effets à long terme; cependant, l'incertitude est encore grande quant aux types de changements qui interviendront, le moment où ils se produiront, leur ampleur et leurs répercussions sur nos vies. Les effets les plus importants pourraient ne se faire sentir que dans plusieurs décennies, voire des siècles, mais on peut affirmer avec une certitude raisonnable que les émissions de gaz à effet de serre (GES) ont des effets à long terme et que ces derniers sont cumulatifs. C'est pourquoi nous devons agir dès maintenant. L'absence de répercussions immédiates pose un défi important sur le plan des politiques : comment les décideurs peuvent-il encourager la population à modifier ses comportements dès aujourd'hui pour prévenir un problème autour duquel planent toujours des incertitudes?

Il sera encore plus ardu de trouver des moyens d'atteindre les objectifs de ces politiques à l'échelle internationale. L'atmosphère est dépourvue de frontières – les GES émis dans un pays ou une région traversent librement leurs frontières. En fait, on prévoit même que certaines des répercussions les plus désastreuses des changements climatiques toucheront les régions où les émissions sont les plus faibles. Les régions les plus septentrionales, par exemple, subiront probablement les plus importantes élévations de température. Les petites îles tropicales seraient aussi menacées : elles pourraient être complètement submergées si le niveau de la mer montait.

Pour stabiliser les concentrations de GES à des niveaux qui préviendrait de graves changements climatiques, il faudra prendre des mesures d'atténuation des GES à l'échelle planétaire. Dans le présent chapitre, on examinera l'évolution des ententes et stratégies internationales visant l'atténuation des changements climatiques – et en particulier la réponse du Canada à cette évolution. On y présentera également des pratiques novatrices d'atténuation des GES d'origine agricole et les interventions de certains producteurs canadiens déterminés qui ont déjà pris l'initiative d'adopter de telles stratégies sur leurs propres terres.

Gérer les changements climatiques sur la scène mondiale

La lutte mondiale contre les changements climatiques a été lancée en 1979 lors de la première Conférence mondiale sur le climat, une rencontre intergouvernementale qui s'est tenue à Genève pour examiner les effets du changement du climat sur les activités humaines, notamment l'agriculture, la pêche, la foresterie, l'hydrologie et l'urbanisme. Les participants ont rédigé une déclaration à l'intention des gouvernements du monde entier dans laquelle ils les invitaient à anticiper et à prévenir les changements climatiques causés par l'homme, qui pourraient nuire

au bien-être de l'humanité. Ils y déclaraient également que la principale cause du réchauffement de la planète est l'augmentation de la concentration atmosphérique de CO_2 résultant de la combustion de combustibles fossiles, de la déforestation et des changements d'affectation des terres.

En 1988, l'Organisation météorologique mondiale et le Programme des Nations Unies pour l'environnement ont créé le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Le rôle du GIEC est d'évaluer les données disponibles de nature scientifique, technique et socioéconomique et d'élaborer des rapports sur les risques liés au changement climatique induit par l'activité humaine, ses conséquences possibles et des mesures d'adaptation et d'atténuation. La publication du premier rapport d'évaluation du GIEC, en 1990, a été une étape importante dans l'élaboration de la première entente internationale visant à contrer le changement du climat à l'échelle planétaire, la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques.

La Convention-cadre, ratifiée par 192 pays, repose sur le *principe de précaution* qui préconise une démarche « sans regrets ». En vertu de ce principe, elle postule que s'il existe un risque d'atteintes graves et irréversibles à la santé humaine ou à l'environnement, l'absence de certitude scientifique absolue quant aux causes et aux effets du risque en question ne doit pas être invoquée comme raison pour différer l'adoption de mesures de prévention. En ratifiant la Convention-cadre, des gouvernements du monde entier ont reconnu que, malgré un certain degré d'incertitude quant à la façon dont l'effet de serre pourrait changer le climat, les répercussions potentielles de ce phénomène sont si graves que la seule attitude responsable à adopter consiste à agir dès maintenant.

La Convention-cadre vise la stabilisation des concentrations des gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui préviendrait de dangereuses perturbations du système climatique. Elle a établi des cibles volontaires de réduction des émissions de GES et préconisé qu'il fallait ramener ces dernières à leurs niveaux de 1990. Les pays développés sont tenus de présenter des rapports nationaux sur leurs émissions de GES et d'appuyer la production de tels rapports par les pays en développement en leur fournissant une aide financière et technique.

Les gouvernements et les scientifiques ont reconnu que les objectifs volontaires adoptés en vertu de la Convention-cadre devraient être resserrés pour arriver à prévenir de graves changements climatiques. Les gouvernements signataires de la Convention-cadre ont donc poursuivi leurs négociations pour s'entendre sur des

engagements plus rigoureux et plus juridiquement contraignants en matière de réduction des émissions. En 1997, ils sont parvenus à un consensus qui a pris la forme du Protocole de Kyoto, une série d'objectifs chiffrés devant être atteints entre 2008 et 2012 en vue de réduire de 5 % les émissions de GES mondiales par rapport aux niveaux de 1990. Le Protocole de Kyoto est devenu une loi internationale le 16 février 2005. Les pays, dont le Canada, ayant accepté de participer au Protocole sont donc parties prenantes au premier accord international fondé sur des cibles contraignantes de réduction des émissions et au premier accord international en matière d'environnement qui tentera d'atteindre ses objectifs en faisant appel aux forces du marché par la création d'un marché du carbone.

La plupart des parties à la Convention-cadre ont ratifié le Protocole de Kyoto. En juillet 2006, 61 % des émissions des pays développés étaient prises en compte par le Protocole de Kyoto. L'engagement des divers pays signataires varie : par rapport aux niveaux d'émission de 1990, la cible de réduction du Canada est de 6 %, de 21 % pour le Danemark et l'Allemagne et de 30 % pour la Grèce. Les États-Unis (qui sont responsables d'environ 25 % des émissions mondiales) et l'Australie sont les deux pays développés d'importance à ne pas avoir ratifié le Protocole de Kyoto – mais ils possèdent tous deux leurs propres programmes de réduction des émissions de GES.

Les pays en développement n'ont pas d'objectif de réduction des émissions en vertu du Protocole de Kyoto. L'accord prévoit que des cibles seront établies pour ces pays dans des ententes ultérieures, une fois que les pays développés – qui sont responsables de la plus grande proportion de l'augmentation des émissions de GES jusqu'à présent – auront franchi les premières étapes vers la réduction de leurs émissions.

LA RÉDUCTION DES ÉMISSIONS COMME MONNAIE D'ÉCHANGE

Le système d'échange des droits d'émissions est un outil prometteur pour aider à diminuer les coûts relatifs à la réduction des émissions. Dans un marché du carbone, les vendeurs, des producteurs agricoles par exemple, génèrent des crédits de réduction des émissions de carbone en diminuant leurs émissions ou en augmentant l'absorption des GES. Les acheteurs achètent ces crédits pour compenser leurs propres émissions. Un tel marché peut offrir des crédits à un coût relativement faible aux acheteurs et des incitatifs financiers à l'adoption et à la mise au point de technologies et de pratiques à faible émission aux producteurs agricoles et aux autres entreprises. On ne prévoit pas que la valeur des droits d'émissions échangés sera suffisamment élevée, du moins à court terme, pour amener les producteurs agricoles à orienter leurs systèmes de production vers l'obtention de crédits de carbone plutôt que vers la production d'aliments et de fibres. On croit cependant que, dans certains cas, l'échange de droits d'émissions pourrait faire pencher la balance en faveur de pratiques atténuant les GES.

Les pays peuvent donc atteindre leurs objectifs de deux façons : en réduisant leurs émissions de GES ou en créant des *puits*[2] de carbone biologiques pour compenser leurs émissions. On peut créer des puits en créant de nouvelles forêts, en réduisant la déforestation et par d'autres activités liées à l'aménagement des forêts, des terres cultivées et des prairies.

Les effets du Protocole de Kyoto sur l'agriculture

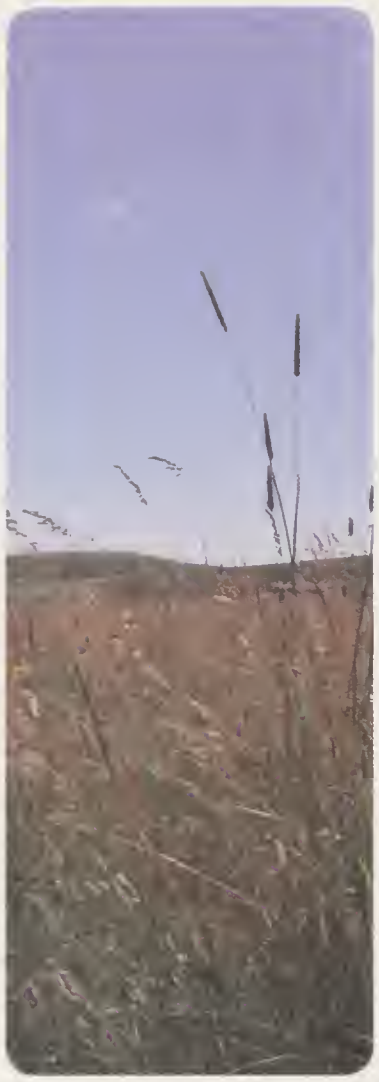
En vertu de la Convention-cadre et du Protocole de Kyoto, les pays participants doivent déclarer leurs émissions d'origine agricole, en particulier pour les sources et les gaz énumérés dans le tableau 9. L'agriculture est responsable d'environ 8 % des émissions de GES du Canada, ce qui comprend la plupart de ses émissions de N_2O et de CH_4.

TABLEAU 9

GES et sources d'émissions du secteur agricole qui doivent faire l'objet d'un rapport international

SOURCE	ACTIVITÉ	GES
Fermentation entérique	Ruminants	CH_4
Gestion du fumier	Manipulation ou entreposage du fumier des animaux d'élevage	CH_4 et N_2O
Riziculture	Production de paddy en rizière inondée	CH_4
Sols agricoles	Engrais synthétique azoté	N_2O
	Épandage de fumier sur les sols	N_2O
	Fumier des animaux en pacage dans un pâturage	N_2O
	Décomposition des résidus de culture	N_2O
	Exploitation des sols organiques	N_2O
	Volatilisation	N_2O
	Lessivage, érosion et ruissellement	N_2O
Brûlage sur place des résidus agricoles		CH_4 et N_2O
Brûlage dirigé des savanes		CH_4 et N_2O

[2] *Un puits de carbone biologique est un processus qui permet de transférer le CO_2 de l'atmosphère dans un réservoir, comme une forêt ou des sols, grâce à la photosynthèse.*



L'agriculture est un système de production biologique. Les émissions de CO_2, de CH_4 et de N_2O sont une conséquence naturelle de la production agricole et elles ne pourront jamais être totalement éliminées. Le but des accords internationaux est toutefois d'encourager la recherche de meilleurs moyens de gérer le recours aux nutriments et à l'énergie afin qu'ils soient utilisés plus efficacement par les cultures et les animaux plutôt que libérés sous forme de *fuites* de gaz ou dissous dans l'eau.

Les systèmes culturaux peuvent aussi être aménagés de façon à absorber le CO_2 de l'atmosphère en séquestrant le carbone dans les sols. En vertu du Protocole de Kyoto, les pays doivent rendre compte de toutes leurs émissions et absorptions de GES attribuables à la conversion de terres cultivées en forêts (boisement et reboisement) et à la conversion de forêts en terres agricoles (déboisement). Les pays peuvent aussi choisir de comptabiliser les changements des stocks de carbone dans le sol imputables à l'amélioration de la gestion. À l'origine, cette disposition a suscité des controverses parce que la séquestration du carbone dans les sols agricoles est réversible. Ainsi, par exemple, le carbone emmagasiné peut être perdu si les responsables de l'aménagement des terres modifient leurs pratiques de gestion ou si les changements climatiques réduisent le rendement des cultures.

Activités du Canada touchant les changements climatiques et l'atténuation des GES

Le Canada a ratifié le Protocole de Kyoto en décembre 2002. Les activités intérieures du Canada touchant les changements climatiques et l'atténuation des GES couvrent le secteur agricole. Au Canada, les objectifs en matière d'atténuation des GES et de changements climatiques sont intégrés au plan de travail global du pays touchant l'environnement et la durabilité pour le secteur agricole.

Les producteurs agricoles gèrent les terres de façon à ce qu'elles se prêtent à la culture agricole à long terme. Ils prennent leurs décisions en soupesant tous les éléments de leur système de production et en déterminant quelle combinaison d'activités et de pratiques offrira les meilleurs résultats possibles sur les plans économique et environnemental. Les politiques élaborées par les gouvernements en matière d'agriculture ont souvent pour but d'appuyer les producteurs pour leur permettre d'atteindre des objectifs ayant une portée sociale ou publique plus vaste, ce qui comprend des objectifs environnementaux tels que l'adaptation aux changements climatiques et l'atténuation des GES.

Heureusement, l'atténuation des GES repose surtout sur la bonne gestion des terres, la conservation des ressources et la gestion adéquate des cycles du carbone et de l'azote. De nombreuses mesures d'atténuation des GES offrent aussi des avantages sur les plans économique et environnemental. C'est ce qui explique que beaucoup de producteurs agricoles adoptent de bonnes mesures de façon volontaire. Sans ces avantages, il serait difficile de les motiver à réduire leurs émissions pour éviter des impacts environnementaux qui ne sont pas encore très bien définis.

Lorsque les scientifiques ont commencé à chercher des moyens de réduire les GES associés à la production des cultures et à l'élevage, ils se sont rendu compte que de nombreux changements et innovations récents dans les systèmes de culture et d'élevage contribuaient déjà à réduire les émissions. C'est donc le signe que les objectifs d'atténuation des GES donnent un nouvel essor à la compréhension et à la promotion de ces pratiques bénéfiques.

RÉPONSE DES PRODUCTEURS AGRICOLES CANADIENS

UN PRODUCTEUR DE PORCS REÇOIT LE PRESTIGIEUX PRIX EMERALD

Dennis McKerracher, un producteur porcin de High River, en Alberta, n'en croyait pas ses oreilles lorsqu'il a appris qu'il avait gagné le très convoité prix Emerald de l'Alberta Emerald Foundation for Environmental Excellence dans la catégorie Recherche et innovation.

M. McKerracher a mérité ce prix pour un projet de recherche à la ferme d'un an, qui visait à étudier des moyens de réduire les quantités d'eaux usées et de GES dans les exploitations d'élevage porcin. Appuyé par le Programme de réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur canadien de l'agriculture, l'initiative albertaine Climate Change Central, le Conseil canadien du porc et Alberta Pork, le projet de M. McKerracher a permis de mesurer et de comparer les répercussions de l'utilisation d'abreuvoirs à bille et d'abreuvoirs ordinaires dans son exploitation par renouvellement intégral de 500 porcs d'engraissement.

Les résultats de ces travaux de recherche ont montré que, sur une année, les abreuvoirs à bille avaient réduit de 35 % la consommation d'eau de boisson. Avec l'abreuvoir à bille, le porc doit mettre la sucette complètement dans sa gueule pour obtenir de l'eau, actionnant ainsi un levier qui laisse passer l'eau.

Les résultats de cette étude sont importants. Les économies en eau réalisées dans l'exploitation de M. McKerracher réduisent la quantité d'eau qu'il doit pomper dans les abreuvoirs. Le processus est non seulement rentable, mais il permet d'épargner du temps. De plus, comme la consommation d'eau est réduite, la gestion des fumiers est plus efficace, diminuant ainsi la production de gaz à effet de serre.

« En tant que producteur agricole, déclare M. McKerracher, je crois que c'est ma responsabilité de perturber le moins possible l'équilibre écologique. Je trouve très stimulant de pouvoir y contribuer dans ma propre exploitation, mais la plus belle récompense est de constater que mon projet peut avoir des répercussions de plus grande envergure pour l'environnement et pour l'industrie. »

—Conseil canadien du porc, 21 juin 2006

LA CULTURE SANS LABOUR : UN RENDEMENT QUI AUGMENTE POUR UN INVESTISSEMENT QUI DIMINUE

Jim Halford est un ardent défenseur de la culture sans labour et du semis direct. Ce fermier du Sud-Est de la Saskatchewan a abandonné son équipement aratoire depuis plus de 20 ans et en a été récompensé depuis lors.

M. Halford explique que le rendement de ses cultures de blé dur roux de printemps sur une partie des terres de son exploitation de la région d'Indian Head a augmenté de presque 15 % par rapport à celui qu'on obtient sur les terres cultivées de façon traditionnelle, et que l'utilisation d'engrais azotés a été réduite de 40 %. Il attribue ces bénéfices continus quelque peu surprenants à la culture sans labour à long terme et à l'application précise d'engrais.

« C'est attribuable à l'augmentation de la teneur du sol en matières organiques, explique M. Halford. Cette hausse augmente la capacité du sol à minéraliser l'azote qui devient plus facilement assimilable par les plantes. »

Sur les terres de M. Halford, un loam sableux de type argileux, la culture sans labour s'est traduite par une réduction d'environ 40 % des engrais utilisés pour une récolte fort respectable de 45 à 50 boisseaux de blé dur roux du printemps. C'est la différence entre l'épandage de 50 à 60 livres d'azote par rapport à l'application plus classique de 90 livres par acre, qui se traduit par des économies de 12 à 16 $ l'acre pour M. Halford.

« Les avantages de la culture sans labour sur le plan économique et sur celui de la production s'intègrent bien à l'objectif national de réduction des émissions de GES d'origine agricole », déclare M. Doug McKell, directeur général du Conseil de conservation des sols du Canada. Le Conseil administre le financement des projets dans le domaine de la gestion des sols et des éléments nutritifs dans le cadre du Programme de réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur canadien de l'agriculture. Le mandat du programme est de sensibiliser les producteurs aux pratiques qui favorisent la production tout en réduisant les émissions de GES, et de promouvoir leur adoption.

« La culture sans labour se traduit par tout un éventail d'avantages sur les plans de la production et de l'économie », déclare M. Halford, qui est bien connu dans toute l'Amérique du Nord pour avoir mis au point le Conserva Pak Seeding System. Il note qu'un épandage approprié des semences et des engrais est un facteur important pour le succès des cultures. De plus, l'amélioration de la qualité du sol permet aux intrants d'atteindre leur plein potentiel.

Les avantages de la culture sans labour s'accumulent avec le temps. Donc, plus longtemps on cultive la terre sans labour, plus la qualité du sol s'améliore. Par exemple, les matières organiques du sol augmentent d'environ 1 % tous les cinq ans sans labour. Sur une période de 13 ans sans labour, la teneur du sol en matières organiques passe donc de 2,7 % à 5,1 %.

« L'augmentation des matières organiques dans le sol entraîne directement une plus grande minéralisation des nutriments qui deviennent plus facilement assimilables par les plantes, explique M. Jeff Schoenau, Ph.D. et agronome pédologue de l'Université de la Saskatchewan. Ce processus ne se fait pas du jour au lendemain dès la première année de culture sans labour. Au cours des trois à cinq premières années sans labour, les besoins en engrais peuvent même augmenter, souligne-t-il. La conversion se fait au fur et à mesure que les matières organiques augmentent dans le sol. »

—Conseil de conservation des sols du Canada

DES IDÉES RÉVOLUTIONNAIRES ISSUES DE LA COLLECTIVITÉ SCIENTIFIQUE

L'INDICE DE CONSOMMATION NET : UN OUTIL PROMETTEUR POUR L'INDUSTRIE BOVINE CANADIENNE

L'industrie bovine du Canada entend bien économiser plus de 200 millions de dollars annuellement au chapitre de l'alimentation en adoptant une technologie qui permet la sélection d'animaux en fonction de leur *indice de consommation net*, déclarait un éminent chercheur spécialiste des bovins qui possède plus de 25 ans d'expérience dans l'élevage et la gestion des bovins de boucherie.

« Au cours de toutes ces années passées dans l'industrie bovine, je n'ai jamais vu une caractéristique avoir autant de potentiel que l'indice de consommation net », affirmait M. John Basarab, Ph.D. et chercheur au ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Alberta. L'indice de consommation net, aussi appelé consommation alimentaire résiduelle, est une découverte relativement récente mais qui gagne rapidement la reconnaissance des scientifiques, de l'industrie privée et des producteurs novateurs à l'échelle internationale.

L'Australie a été le premier pays à mettre au point une technologie commerciale, au milieu des années 1990, permettant de mesurer la consommation d'aliments d'un animal, une mesure clé pour le calcul de l'indice de consommation net. Mais le coût de production et d'exploitation de cette technologie était prohibitif.

À la suite d'un voyage d'exploration en Australie, M. Basarab et ses collègues, Bob Kemp, Ph.D., et Warren Snelling, Ph.D., ont sollicité l'aide d'une entreprise de l'Alberta, GrowSafe Systems Ltd., pour la mise au point d'un modèle moins coûteux et plus efficace.

L'aboutissement de ce projet a été la création d'une nouvelle norme en matière d'équipement de mesure de la consommation alimentaire, dont le coût de production n'est que le dixième de celui du modèle australien, et dont l'exploitation ne nécessite que moins d'un cinquième de la main-d'œuvre. Les scientifiques ont aussi établi le bien-fondé du recours à l'indice de consommation net à titre d'outil de mesure dans une série d'études financées en partie par le Canada Alberta Beef Industry Development Fund (CABIDF). En 2006, l'adoption commerciale de cette technologie et de cette démarche avançait à grands pas. « De plus en plus d'éleveurs testent actuellement des taureaux, et ceux qui affichent un bon indice de consommation net trouvent preneur dans l'industrie et sont souvent vendus plus cher », explique M. Basarab.

« Pour tirer avantage de l'indice de consommation net, l'une des priorités de l'industrie bovine au cours des trois à cinq prochaines années devrait être d'identifier les meilleurs taureaux qui possèdent cette caractéristique », souligne-t-il. Pour l'heure, en Alberta, les chefs de file novateurs qui représentent environ 5 % de l'industrie vont de l'avant, mais nous aimerions voir l'utilisation de cette technologie se répandre graduellement dans toute l'industrie. »

—Canadian Cattlemen's Association

ALIMENTATION DES BOVINS ET RÉDUCTION DES ÉMISSIONS

Une étude a été menée par l'Université de Guelph dans les exploitations Elora Dairy Research Farm et Mayhaven Farms à Rockwood, en Ontario, pour évaluer dans quelle mesure l'utilisation de maïs roulé à sec et d'un extrait d'huile de palme (acide myristique) dans l'alimentation des vaches pouvait réduire les émissions de CH_4.

La production de CH_4 représente de l'énergie alimentaire perdue lors du processus de digestion des vaches, cette perte pouvant atteindre 12 %. Étant donné que le CH_4 ne contribue pas à la production de lait, il constitue une perte d'énergie alimentaire qui peut accroître les coûts de l'alimentation. Le maïs roulé à sec et l'acide myristique ont été incorporés séparément aux rations totales mélangées destinées à l'alimentation quotidienne des vaches. Les émissions de CH_4 ont été captées et mesurées dans l'air expiré par les vaches à l'aide d'une cloche spécialement conçue à cet effet. Des expériences ont permis de comparer le maïs floconné à la vapeur avec le maïs roulé à sec pour déterminer lequel de ces deux aliments entraînait le plus d'émissions de CH_4 par les vaches. Le maïs roulé à sec a produit 7 % moins de CH_4 par jour par kilogramme de lait produit que le maïs floconné à la vapeur. Par ailleurs, l'acide myristique a fait encore mieux, réduisant les émissions de CH_4 de 28 % par jour par kilo de lait produit.

Bien que l'acide myristique soit nettement supérieur au chapitre de la réduction des émissions de CH_4, le recours au maïs roulé à sec ne représente qu'une légère modification au régime alimentaire classique. Il est donc probablement plus facile et plus pratique pour les producteurs d'incorporer du maïs roulé à sec dans l'alimentation de leurs vaches. De plus, le maïs roulé à sec présente un avantage non seulement pour la santé des vaches mais également pour l'environnement.

—Les producteurs laitiers du Canada

AMÉLIORER LES RÉSULTATS PAR L'AMÉNAGEMENT DES TERRES CULTIVÉES

Il y a longtemps qu'on fait de la recherche sur le carbone du sol au Canada, et la plupart des producteurs agricoles savent très bien que la perte des matières organiques du sol entraîne la détérioration de ce dernier. Les producteurs canadiens ont été parmi les premiers à mettre au point des systèmes de production des cultures reposant sur le semis direct, la réduction du travail du sol à son minimum et la culture continue, des pratiques qui maintiennent la qualité du sol. La principale motivation des producteurs pour l'adoption de pratiques novatrices est d'ordre financier – ces mesures offrent un meilleur rendement économique dans la situation actuelle du marché et de l'agriculture. Toutefois, ces pratiques sont maintenant aussi reconnues pour les avantages importants qu'elles offrent sur le plan environnemental, notamment le maintien et l'augmentation des matières organiques dans le sol qui sont une riche réserve de carbone organique et d'azote. (Consultez les chapitres précédents sur le carbone et l'azote pour obtenir une description complète de ces processus.) Par ailleurs, en vertu du Protocole de Kyoto, l'augmentation du carbone organique dans le sol qui découle des changements dans la gestion des terres cultivées et des pâturages peut donner droit à des crédits de carbone qui compenseraient les émissions de GES pendant la première période d'engagement.

—Agriculture et Agroalimentaire Canada

LECTURES COMPLÉMENTAIRES

Environnement Canada, « Rapport d'inventaire national 1990-2005 : sources et puits de gaz à effet de serre au Canada », Environnement Canada, Division des gaz à effet de serre, 2007.

Janzen, H.H., « Soil science on the Canadian prairies—Peering into the future from a century ago », *Revue canadienne de la science du sol*, 2001, vol. 81, p. 489–503.

Paustian, K., J. Antle, J. Sheehan et E.A. Paul, « Agriculture's role in greenhouse gas mitigation », préparé pour le Pew Centre on Global Climate Change, Arlington, VA, septembre 2006 (www.pewclimate.org).

Wall, E. et B. Smit, « Climate change adaptation in light of sustainable agriculture », *Journal of Sustainable Agriculture*, 2005, vol. 27, p. 113–123.

OMM, Conférence mondiale sur le climat : conférence d'experts sur le climat et l'homme : résumés des exposés présentés à la conférence, Genève, 12-23 février 1979, OMM, 1979 - n° 537. ISBN 92-63-10537-5.

Ce que l'avenir nous réserve

ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE DANS LES CONDITIONS À VENIR

Les possibilités sont nombreuses pour améliorer l'efficacité de l'agriculture au chapitre des émissions de GES. Toutefois, en raison de la croissance rapide de la population mondiale, de l'augmentation de la demande alimentaire et de l'amélioration de la qualité des régimes alimentaires, les émissions de GES d'origine agricole continueront de progresser. Les Nations Unies ont prédit que la population mondiale devrait passer de 6,5 milliards de personnes en 2005 à 9,1 milliards en 2050.

On prévoit que l'accroissement de la population des pays en développement sera supérieur à celui que connaîtront les pays développés. Si la production alimentaire de ces pays augmente pour répondre à la demande croissante, il est probable que leurs émissions de GES d'origine agricole s'élèveront également. Comme on prévoit aussi une hausse des revenus, les préférences alimentaires et la demande en produits plus nutritifs (c.-à-d., en produits d'élevage) pourraient faire augmenter encore davantage les émissions associées à la production d'aliments.

Selon les projections actuelles, pour combler les besoins alimentaires de la population en croissance, la production d'élevage mondiale devrait plus que doubler pour passer de 229 millions de tonnes en 2001 à 465 millions de tonnes en 2050. On s'attend aussi à une augmentation de la production laitière qui devrait passer de 580 millions de tonnes à l'heure actuelle à 1 043 millions de tonnes d'ici 2050. L'Environmental Protection Agency des États-Unis prévoit que, dans les conditions actuelles et au rythme où croît la population, les émissions mondiales d'origine agricole grimperont de 25 % entre 2000 et 2020, et qu'une proportion de plus en plus importante de ces émissions sera attribuable aux pays en développement.

ENJEUX INTERNATIONAUX ET PLANÉTAIRES

À l'échelle mondiale, l'agriculture occupe environ 40 % de toutes les terres utilisées et consomme environ 70 % de toute l'eau utilisée. Elle a modifié les cycles des nutriments importants. Elle a plus que doublé l'ampleur du cycle de l'azote et contribue aux émissions mondiales de GES dans une proportion d'environ 10 %, ce qui comprend la plus grande part des émissions mondiales de CH_4 et de N_2O.

Les changements d'affectation des terres

À l'échelle mondiale, en 2000, on comptait environ 5 000 millions d'hectares de terres agricoles comparativement à environ 4 500 millions d'hectares en 1960. L'augmentation de la superficie des terres agricoles et l'avènement de nouvelles techniques de production culturale a permis à la production alimentaire de croître au même rythme que la demande alimentaire et la population mondiale. Or, cette évolution ne s'est pas faite sans répercussions pour l'environnement.

Chaque année, au cours des 40 dernières années, 6 millions d'hectares de forêt et 7 millions d'hectares d'autres types de terres, en moyenne, ont été convertis en terres agricoles, et ce en grande partie dans les pays en développement. L'expansion de l'élevage est un facteur déterminant de la déforestation, surtout en Amérique latine et en Amérique du Sud, où l'on estime que 70 % des terres forestières de l'Amazonie ont été transformées en pâturages et en terres cultivées. Selon les scientifiques, la disparition des forêts tropicales pourrait être le principal facteur déterminant de la stabilisation, ou non, des émissions de GES à un niveau qui préviendrait le changement du climat. Ils estiment que jusqu'à un quart des émissions mondiales d'origine humaine sont attribuables à la disparition de ces forêts, les émissions attribuables à la déforestation au Brésil et en Indonésie étant presque équivalentes aux objectifs totaux de réduction des émissions du Protocole de Kyoto.

Si on exclut les régions tropicales, les activités liées à l'utilisation des terres et au changement d'affectation des terres qui étaient une *source* de GES dans les années 1980 sont devenues un petit *puits* dans les années 1990. Ce phénomène est attribuable au reboisement de certaines terres agricoles, aux efforts accrus de lutte contre les incendies de forêt et à la séquestration du carbone dans les sols cultivés grâce à des changements de gestion des terres. Il n'est toutefois pas certain que les puits terrestres des régions tempérées puissent survivre aux changements climatiques à long terme.

On s'attend aussi à voir augmenter les émissions de GES d'origine agricole autres que le CO_2 au cours des prochaines décennies. L'agriculture est la plus importante source de CH_4 et de N_2O d'origine humaine, et, selon l'Environmental Protection Agency aux États-Unis, cette tendance ne serait pas près de diminuer. Les sols agricoles sont la principale source d'émissions de N_2O, alors que la principale source de CH_4 est le bétail.

La production agricole devrait augmenter en Asie, en Amérique latine et en Afrique pour répondre à la demande. En 1990, les pays développés étaient responsables du tiers environ des émissions de N_2O provenant des sols. D'ici 2020, les projections indiquent que cette contribution devrait tomber à 23 %, tandis que les émissions des sols provenant de la Chine et du reste de l'Asie s'élèveraient jusqu'à 50 % et celles de l'Afrique, de l'Amérique latine et du Moyen-Orient, de plus de 100 %. Quant au CH_4, la hausse de ses émissions mondiales proviendra surtout de la Chine, de l'Amérique latine, de l'Afrique et de l'Asie, où l'on prévoit que l'urbanisation et la hausse du revenu par habitant entraîneront un accroissement de la demande en produits d'élevage. À l'inverse, on prévoit que les émissions des pays développés déclineront avec le temps en raison d'une production plus efficace et d'une réduction de la demande d'exportation.

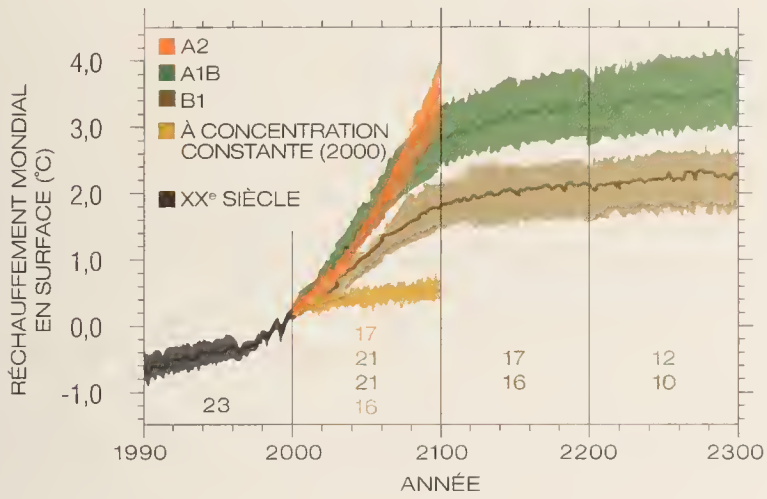
L'évolution de notre climat

Les scientifiques font des projections sur l'avenir de notre climat à l'aide de modèles climatiques mondiaux – généralement appelés modèles de circulation générale – fondés sur des scénarios qui représentent toute une gamme de conditions futures potentielles, notamment les concentrations atmosphériques de GES, la taille de la population ainsi que divers changements en matière de développement socioéconomique et de technologie. Ces projections dépendent largement d'hypothèses sur les conditions à venir et sur les processus qui devraient nous y conduire. Malgré tout, de plus en plus de scientifiques s'entendent pour dire que notre climat sera plus chaud et que les phénomènes climatiques et météorologiques extrêmes seront plus fréquents.

Les scénarios climatiques du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat prévoient que les températures mondiales moyennes sont susceptibles de s'élever de 0,2 °C par décennie au cours des vingt prochaines années, comme le montre la figure 52. Les projections les plus élevées tiennent compte des scénarios où le taux de croissance de la population est important et où les émissions de GES se maintiennent à leur niveau actuel (A1B). Les projections les plus faibles reposent sur des hypothèses où la croissance de la population ralentirait et où des mesures importantes d'atténuation des émissions de GES seraient mises en place au cours des prochaines décennies (B1). Les estimations mondiales ne nous renseignent cependant pas vraiment sur les changements de température aux échelles régionale et locale. On consacre donc de plus en plus d'efforts à la recherche de moyens d'utiliser les données tirées des modèles de circulation générale pour projeter le climat à l'échelle régionale.

FIGURE 52

Projections en matière de réchauffement planétaire pour divers scénarios



Les lignes en traits pleins correspondent à des moyennes globales multi-modèles du réchauffement en surface (par rapport à 1980-1999) pour les scénarios A2, A1B et B1, indiqués comme le prolongement des simulations du XXe siècle. Les valeurs au-delà de 2100 correspondent aux scénarios fondés sur la stabilisation des émissions. Le nombre de modèles fondés sur un scénario donné est indiqué en couleur au bas du graphique pour chaque période et scénario.

Source : QRE du GT1 du GIEC, chapitre 10, Global Climate Projections. En ligne a : http://www.ipcc.ch/graphics/graphics/ar4-wg1/ppt/figure10.ppt. Consulté le 22 janvier 2008.

CHANGEMENTS CLIMATIQUES AU CANADA

Les scientifiques ont appliqué les données sur le climat obtenues par le modèle de circulation générale du Centre canadien de modélisation et de l'analyse climatique (modèle MCG canadien couplé avec les aérosols) aux trois provinces des Prairies dans deux conditions : le climat actuel et le climat futur associés à un doublement de la concentration atmosphérique du CO_2. Le modèle a prévu une augmentation moyenne de 2 °C à 3 °C des températures maximales et d'environ 3 °C des températures minimales. Comparativement aux conditions climatiques actuelles, les précipitations seraient de 3 % à 7 % plus élevées. Les résultats laissent à penser que l'Alberta recevrait la plus grande part de ces nouvelles précipitations estivales et hivernales, tandis que l'est de la Saskatchewan et le Manitoba ne connaîtraient que peu de changements à cet égard ou une augmentation moins importante de leurs précipitations. Il importe de souligner que les changements projetés en matière de précipitations comportent une plus grande incertitude que les estimations concernant les changements de température. Étant donné que la plus grande proportion de la région des Prairies est caractérisée par un déficit hydrique pendant la saison de croissance, une diminution, même faible, de l'humidité pourrait nuire considérablement à la production des cultures.

On dispose de beaucoup de données montrant que le climat a déjà commencé à changer :

- La température moyenne à la surface du globe s'est élevée de 0,6 ± 0,2 °C au cours des 100 dernières années.
- Les années 1990 ont été la décennie la plus chaude des 1 000 dernières années.
- L'étendue de la plage des températures diurnes à la surface du sol a diminué entre 1950 et 2000, les températures nocturnes minimales augmentant deux fois plus vite que les températures diurnes maximales.
- On a enregistré plus de jours chauds et moins de jours froids ou de jours de gel au cours des dernières décennies.
- Les précipitations continentales se sont accrues de 5 à 10 % au cours du XXe siècle dans l'hémisphère nord et elles ont décliné dans certaines régions de l'Afrique et de la Méditerranée.
- La fréquence des précipitations abondantes a augmenté aux latitudes nordiques moyennes et élevées, et la fréquence et la gravité des sécheresses se sont accentuées.
- L'étendue des glaces de mer a diminué.
- On a observé des changements dans la distribution de certaines espèces.
- Le niveau moyen de la mer à l'échelle mondiale a monté.

Au Canada, un pays situé à une latitude élevée, on s'attend à ce que le réchauffement soit plus marqué que le réchauffement moyen à l'échelle planétaire, le nord ainsi que le sud et le centre des Prairies subissant un réchauffement plus important que les autres régions. La plupart des régions connaîtront probablement une élévation de leurs températures, un allongement de la saison sans gel et une augmentation de l'évapotranspiration.

Les changements climatiques pourraient modifier notre paysage agricole

L'agriculture est tout à la fois extrêmement importante pour l'économie canadienne et sensible aux changements climatiques de par sa nature même. Le climat détermine la distribution géographique des systèmes agricoles au Canada et, dans une large mesure, les fluctuations du rendement des cultures d'une année à l'autre, attribuables aux sécheresses, aux inondations, aux ravageurs et aux tempêtes. Le climat a des effets, positifs et négatifs, sur l'agriculture, qui touchent aussi bien les plantes et les animaux individuellement que les systèmes planétaires.

Nos cultures

Le changement du climat influera sur la production canadienne des cultures, mais les projections à cet égard sont extrêmement variables et présentent un nouvel ensemble de risques *et* d'avantages. Par exemple, certaines simulations par modèle donnent à penser que les producteurs agricoles pourraient être en mesure de semer plus tôt de façon que la croissance des cultures soit terminée avant la

chaleur et la sécheresse de la fin de l'été. Si les producteurs arrivent à s'adapter aux changements climatiques de cette façon, les rendements du canola, du maïs et du blé pourraient être épargnés, et la variété des cultures pouvant être produites au Canada pourrait s'étendre.

Par contre, l'augmentation de la tension hydrique et des sécheresses est préoccupante pour les cultures irriguées ou non dans tout le pays. Même si l'on sait que les changements climatiques pourraient modifier les conditions d'humidité et les taux potentiels d'évapotranspiration, l'ampleur et la direction de ces changements sont toujours empreintes d'une grande incertitude. L'allongement de la saison de croissance et l'élévation des températures pourraient faire augmenter la demande en eau. Les sécheresses pourraient donc être plus fréquentes.

Les modèles du climat laissent croire que le réchauffement sera plus important l'hiver, ce qui réduirait le risque de dommages causés aux cultures vulnérables, comme les arbres fruitiers et les vignes. Par contre, l'absence de très grands froids au cours de l'hiver pourrait favoriser la survie des ravageurs des cultures. Par ailleurs, l'augmentation de la fréquence des phénomènes extrêmes, comme les températures élevées, les inondations, les sécheresses et les tempêtes, pourrait aussi nuire à la production future des cultures au Canada.

Nos élevages

Le réchauffement du climat pourrait aussi avoir des effets bénéfiques *et* nuisibles sur la production d'élevage. Les avantages seraient surtout évidents l'hiver où les besoins alimentaires seraient plus faibles, le taux de survie des jeunes serait plus élevé et les coûts énergétiques seraient diminués. Des étés plus chauds, par contre, pourraient se traduire par une augmentation de la mortalité attribuable aux vagues de chaleur – surtout dans les élevages de volaille – une réduction de la production laitière et de la reproduction des bovins laitiers ainsi que par une diminution du gain pondéral des bovins de boucherie.

Les sécheresses et les inondations pourraient réduire la disponibilité des pâturages et la production fourragère, ce qui obligerait les producteurs à trouver d'autres sources alimentaires ou à réduire la taille de leurs troupeaux.

Nos sols

Le changement du climat pourrait altérer la qualité des sols agricoles en modifiant la quantité de matières organiques dans le sol, le cycle et le lessivage des nutriments, l'érosion éolienne et hydrique ainsi que le ruissellement, tous ces facteurs pouvant mener à une élévation des émissions de CO_2 et de N_2O des sols. Par contre, les changements climatiques pourraient améliorer la qualité du sol, stimuler la séquestration du carbone et réduire les émissions de gaz à effet de serre s'ils étaient assez importants pour forcer le changement d'affectation des terres, c'est-à-dire le remplacement des cultures annuelles par des cultures vivaces et des pâturages.

Ravageurs et maladies

Les scientifiques ont publié une liste des effets potentiels du changement du climat sur les ravageurs et les maladies. Ils comprennent une augmentation de la croissance des mauvaises herbes imputable à une élévation de la concentration atmosphérique du CO_2, une augmentation de la prévalence des ravageurs et des agents pathogènes du bétail et des cultures ainsi qu'une augmentation des aires de distribution des insectes, de la fréquence et de la gravité des infestations et des maladies. Ces changements n'auront pas d'effets importants sur les émissions de GES provenant des systèmes de production des cultures, mais ils pourraient causer une augmentation de l'utilisation d'énergie associée à la fabrication, au transport et à l'application des pesticides.

L'atténuation des GES offre des possibilités à l'agriculture

Les émissions de GES sont inhérentes aux cycles du carbone et de l'azote. Tout système biologique génère donc inévitablement une certaine quantité de gaz. Ainsi, il est impossible d'éliminer l'émission de CH_4 par les ruminants, les émissions de N_2O produites par la décomposition des résidus des cultures de légumineuses et les émissions de N_2O et de CH_4 provenant des déjections du bétail.

On peut toutefois éviter une partie des émissions de GES provenant des cultures et du bétail. Ces émissions représentent les « fuites » et l'inefficacité du système de production et elles ont des conséquences tant sur le plan environnemental qu'économique. Par exemple, les émissions de N_2O montrent l'inefficacité de l'utilisation des engrais azotés, et les émissions de CH_4 par les ruminants sont le signe que les aliments ne sont pas efficacement convertis en lait ou en viande.

Il existe une abondante documentation sur les systèmes de production végétale et animale qui permettent de réduire les émissions de GES tout en offrant des avantages économiques. En voici quelques exemples :

1. Utiliser aussi efficacement que possible les intrants – comme les engrais et les machines – associés à des émissions importantes provenant des combustibles fossiles;
2. Utiliser une partie de la biomasse produite par les terres agricoles pour produire de la bioénergie afin de remplacer partiellement les combustibles fossiles; (Le chapitre sur les biocarburants explique en détail la production de biocarburants au Canada et dans d'autres pays.)
3. Utiliser les déchets agricoles pour générer de l'énergie;
4. Adopter des pratiques de gestion qui augmentent la quantité de carbone séquestrée dans les sols.

S'adapter aux changements climatiques

Le changement du climat peut aussi bien favoriser l'agriculture que lui nuire. L'élévation des températures, l'allongement des saisons de croissance et l'augmentation des concentrations de CO_2 peuvent améliorer la production agricole. Par contre, la réduction de l'humidité du sol, l'augmentation de la fréquence des phénomènes météorologiques extrêmes et des tempêtes ainsi que l'apparition de nouveaux ravageurs peuvent lui nuire. Des mesures d'adaptation appropriées pourraient réduire les effets, en particulier si elles s'inscrivent dans un processus de décision global à l'échelle de la ferme et des politiques.

Il est probable que les pays en développement auront plus de difficulté à s'adapter aux changements climatiques que les pays développés comme le Canada en raison de leurs ressources limitées. Les dommages causés aux terres et aux ressources en eau imposeront des pressions sur les capacités financières et technologiques de ces pays et auront des répercussions locales sur la production alimentaire. La capacité d'un système agricole de s'adapter aux changements climatiques est déterminée par la qualité de ses ressources naturelles et des conditions économiques, sociales, culturelles et politiques qui y sont associées. Les prévisions à l'échelle mondiale indiquent que la réduction du rendement des cultures sera le plus marqué dans les pays tropicaux, semi-arides et en voie de développement, et le moins marqué dans les pays développés situés à des latitudes élevées – bien que les scientifiques émettent des réserves à l'égard de ces projections en rappelant l'incertitude qui les entoure.

Au Canada, il est peu probable que les changements climatiques suffisent à déclencher un processus d'adaptation. Les producteurs continueront de s'adapter à l'éventail de conditions avec lesquelles ils doivent composer chaque année : le climat, les marchés, les politiques, etc. Il est donc probable qu'ils percevront les changements climatiques comme un élément supplémentaire à prendre en compte dans leur stratégie globale de gestion du risque. Malgré tout, on prévoit que les mesures d'adaptation aux changements climatiques s'inscriront dans l'une des quatre catégories suivantes :

1. Développement technologique

- Nouvelles variétés de plantes cultivées, telles que de nouvelles espèces et de nouveaux hybrides plus tolérants à la chaleur et résistants à la sécheresse ou mieux adaptés aux conditions climatiques extrêmes et aux ravageurs
- Innovations en matière de gestion des ressources en eau, telles que la gestion de la neige pour augmenter les réserves en eau dans les climats semi-arides ou encore la culture sans labour pour réduire les pertes d'eau du sol
- Semis plus précoces pour tirer parti de saisons de croissance plus longues et plus chaudes et pour éviter la période sèche de la fin de l'été

2. Programmes gouvernementaux et régimes d'assurance

- Subventions et régimes d'assurance privés
- Transferts d'eau et modifications des programmes d'assurance-récolte
- Recherche sur la mise au point de nouvelles espèces et hybrides
- Échanges de crédits de carbone

3. Pratiques de production agricole

- Diversification des cultures
- Systèmes d'irrigation favorisant l'économie d'eau
- Réduction du travail du sol et du recours aux produits chimiques
- Ajustement de l'ombrage et du conditionnement d'air pour le bétail
- Utilisation de gicleurs pour rafraîchir le bétail pendant les vagues de chaleur
- Augmentation du pacage au début de la saison pour éviter les périodes de sécheresse estivale

4. Gestion financière des exploitations agricoles

- Programmes de stabilisation du revenu agricole

Au Canada et à l'échelle mondiale, l'agriculture a une grande capacité d'adaptation. Toutefois, on ne sait pas vraiment dans quelle mesure elle peut s'adapter à des conditions climatiques qui sortent de la norme. En fait, il existe des seuils climatiques au-delà desquels les exploitations agricoles et les cultures ne pourront jamais s'adapter. La détermination de ces seuils – et des moyens d'assurer la durabilité de l'agriculture à l'intérieur de ces limites – représente un défi important pour le milieu des chercheurs au Canada et dans le monde entier. Ce n'est qu'en trouvant des réponses à ces questions que nous pourrons assurer la pérennité de nos sources alimentaires.

LECTURES COMPLÉMENTAIRES

Gitay, H, S. Brown, W. Easterling et B. Jallow, « Ecosystems and their goods and services », p. 235-342 dans : J.J. McCarthy, O.F. Canziani, M.A. Leary, D.J. Dokken et K.S. White (éd.), *Climate Change 2001: impacts, adaptation and vulnerability; contribution of Working Group II to the Third Assessment Report on the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, 2001. En ligne à : http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/. Consulté en décembre 2006. (Résumé à l'intention des décideurs et Résumé technique en français)

Lemmen, D. S. et R. Warren (éd.), « *Impacts et adaptation liés aux changements climatiques : perspective canadienne* », Direction des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques, Ressources naturelles Canada, Ottawa, 2004, 219 p.

McGinn, S., A. Toure, O. Akinremi, D. Major et A. Barr, « Agroclimate and crop response to climate change in Alberta, Canada », *Outlook on Agriculture*, 1999, vol. 28, p. 19–28. Cité dans Lemmen et Warren, 2004.

Powlson, D.S., A. Riche et I. Shield, « Biofuels and other approaches for decreasing fossil fuel emissions from agriculture », *Annals of Applied Biology*, 2005, vol. 146, p. 193–201.

Wall, E. et B. Smit, « Climate change adaptation in light of sustainable agriculture », *Journal of Sustainable Agriculture*, 2005, vol. 27, p. 113–123.

Retour aux sources

SOLUTIONS POTENTIELLES

Nous sommes peu nombreux à pouvoir entrevoir l'avenir clairement. Malgré tout, nous savons avec certitude que des changements se préparent – et qu'ils sont à notre porte – car nous sommes de plus en plus nombreux à sonder une planète dont les ressources sont en train de s'épuiser. Comment satisfaire à nos demandes vertigineuses en énergie et en aliments sans produire une plus grande quantité de ces gaz qui mettent en péril notre climat? Nos terres agricoles sont au cœur de ces stress environnementaux et doivent donc faire partie de la solution, quelle qu'elle soit.

Dans certains des chapitres précédents, nous avons présenté des pratiques émergentes qui pourraient contribuer à éviter des changements climatiques nuisibles : cultiver des plantes destinées à la production de biocarburants, par exemple, pour réduire notre dépendance aux combustibles fossiles. D'autres pratiques verront certainement le jour. Celles que nous pouvons d'ores et déjà entrevoir peuvent être regroupées en trois catégories.

Sources d'énergie de remplacement

Pour nous débarrasser des combustibles fossiles qui encrassent notre air, nous devrons trouver des sources d'énergie de remplacement qui permettront à nos sociétés de poursuivre leurs activités. De nombreuses propositions sont envisagées : l'énergie nucléaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydroélectrique, l'énergie de l'hydrogène et l'énergie solaire. Même si elles ne semblent pas liées à l'agriculture, bon nombre d'entre elles pourraient avoir des répercussions sur notre façon de pratiquer l'agriculture. En effet, les éoliennes et les panneaux solaires de l'avenir pourraient être installés sur des terres agricoles. En outre, les réseaux de transport de l'énergie traversent souvent des terres agricoles. Aussi, bien que nombre de systèmes énergétiques ne proviennent pas des fermes, les sources de remplacement que nous choisirons pourraient bien changer l'utilisation agricole de nos terres. De plus, si les biocarburants deviennent des sources d'énergie importantes, la demande qu'ils susciteront exigera encore un réaménagement de nos terres agricoles.

Utilisation plus efficace de l'énergie

Les exploitations agricoles, en particulier celles où la production est intensive, utilisent beaucoup d'énergie. C'est pourquoi nous devrons trouver des moyens d'utiliser l'énergie avec plus de parcimonie sur les fermes, comme nous le faisons dans d'autres industries. Nous aurons besoins de véhicules plus économes en combustibles, d'édifices mieux isolés et de moyens plus efficaces pour transporter les produits agricoles.

L'agriculture dispose de nombreux moyens d'augmenter son efficacité. Les sélectionneurs pourraient mettre au point de nouvelles variétés de plantes cultivées qui offrent des rendements supérieurs ou qui sont florissantes malgré une diminution de l'irrigation ou de l'apport en produits chimiques, qui exige une dépense énergétique. Des spécialistes de l'élevage pourraient mettre au point des pratiques ou des animaux qui produisent plus de viande ou de lait par unité d'énergie. Des vaccins supprimant la libération de CH_4 par les bovins pourraient voir le jour, réduisant ainsi l'émission de puissants GES tout en permettant aux animaux d'utiliser l'énergie alimentaire plus efficacement.

Une autre avenue prometteuse pour la réduction de l'utilisation d'énergie dans les exploitations agricoles repose sur une meilleure gestion des nutriments appliqués aux cultures. La fabrication des engrais, en particulier celle des engrais azotés, nécessite une grande quantité d'énergie (et produit d'abondantes émissions de CO_2). Peut-être pouvons-nous mieux exploiter la fixation biologique de l'azote atmosphérique, présent en abondance, pour remplacer certains engrais azotés. La manipulation génétique pourrait nous donner des céréales capables de fixer elles-mêmes l'azote dont elles ont besoin. Et si nous pouvions utiliser l'azote fixé par les légumineuses pour d'autres cultures? Par exemple, de nouveaux capteurs, sur des satellites ou au sol, pourraient permettre aux producteurs de mesurer avec précision la quantité d'azote dont a besoin une culture pendant sa croissance et ainsi les aider à mieux ajuster la fertilisation aux besoins des cultures.

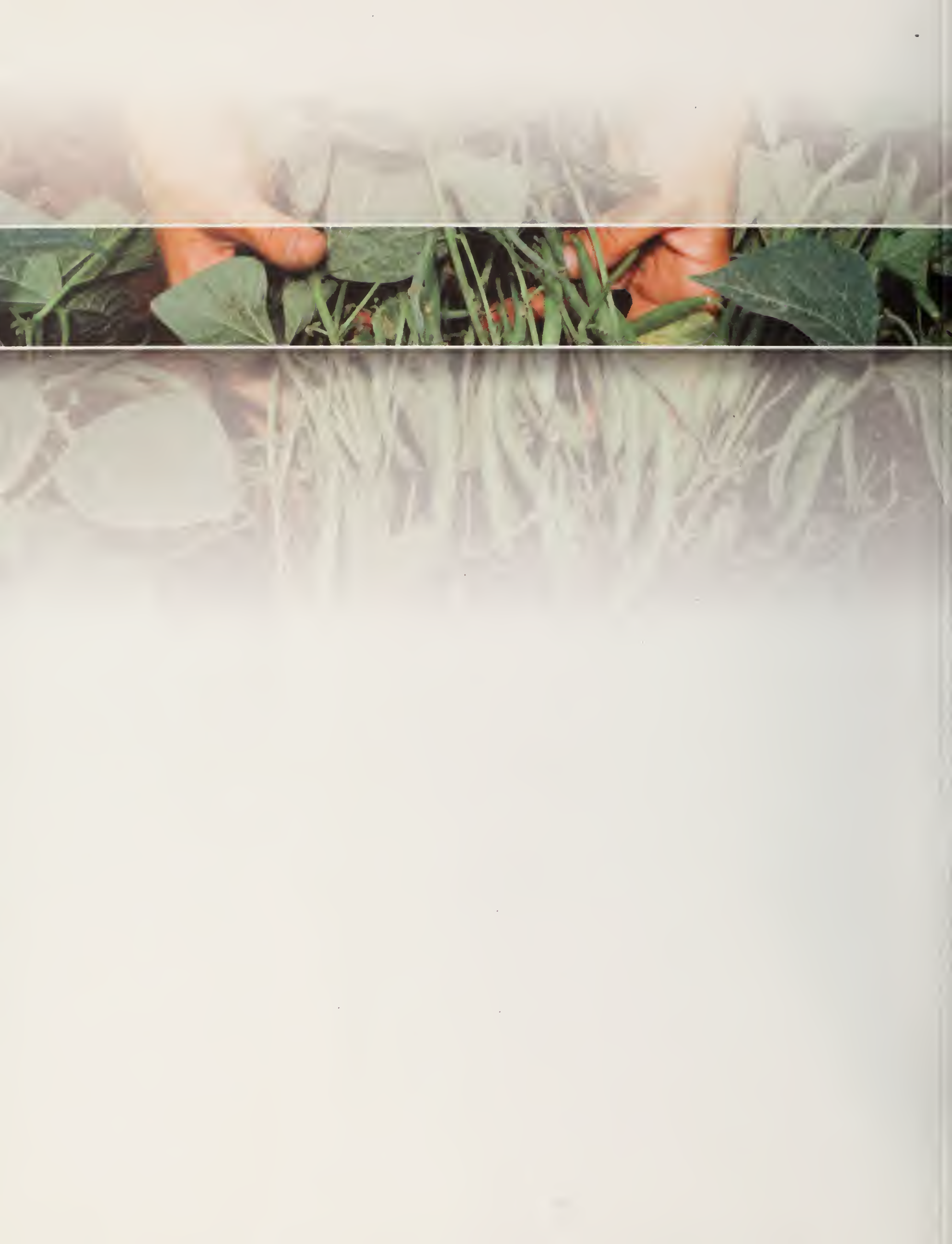
Une autre façon d'utiliser les nutriments plus efficacement consisterait à les recycler plus proprement. Les nutriments contenus dans le fumier pourraient être plus efficacement retournés à la terre, soit par de nouvelles méthodes de transport ou, encore mieux, en élevant le bétail à proximité des terres où leur alimentation est produite. Peut-être pourrions-nous même trouver des moyens sûrs de recycler les nutriments qui se trouvent dans les déchets humains que nous éliminons.

Rétablir le lien entre les consommateurs et les exploitations agricoles

Il fut une époque où la plupart des consommateurs vivaient sur les terres où leurs aliments étaient produits. De nos jours, ils vivent souvent sur un autre continent et ne pensent même pas aux écosystèmes qui assurent leur subsistance. Tout cela pourrait changer. Nous pourrions réapprendre que notre alimentation détermine le devenir de nos terres. En adoptant des régimes alimentaires différents, méticuleusement choisis et conçus, la société pourrait s'orienter vers des systèmes de production alimentaire qui réduisent les émissions d'origine agricole. De plus,

les consommateurs de l'avenir pourraient choisir d'économiser de l'énergie et des émissions en optant pour des aliments et d'autres produits de la ferme provenant d'exploitations situées à proximité de leur domicile. Dans nos sociétés qui s'urbanisent de plus en plus, les plus importants progrès en matière de production alimentaire pourraient survenir, non pas dans les champs des régions rurales et éloignées, mais dans les lopins de terre cultivés en milieu urbain.

Ce ne sont là que quelques exemples de la façon dont les consommateurs pourraient progressivement retrouver le lien qui les unit aux terres exploitées et ainsi réduire les émissions de GES. Il ne fait aucun doute que les visionnaires de demain en trouveront d'autres.

Conclusion

Il est indubitable que bon nombre de solutions à nos dilemmes actuels ne nous ont même pas encore effleuré l'esprit. Elles émergeront certainement d'un retour à une perspective plus réaliste. Au lieu de voir nos terres agricoles – le sol, les arbres, les cultures, l'air qui nous entoure – comme des ressources à exploiter, nous les percevrons comme le foyer qui nous abrite. D'une façon ou d'une autre, quel que soit l'endroit où nous vivons, nous vivons tous sous le même toit que nous léguerons à nos descendants.